

CASO PRÁCTICO

Tendencia de la cobertura vegetal afectada por incendios en el Parque Nacional Torres del Paine

Rivera, C.^{*1}, Mattar, C.², Durán-Alarcón, C.³

¹ Laboratorio para el Análisis de la Biósfera (LAB), Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Universidad de Chile, Av. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile.

² Universidad de Aysén, Obispo Vielmo 62, Coyhaique, Chile

³ Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), CNRS - UMR 5001, Université Grenoble Alpes, Saint-Martin-d'Hères, France.

Resumen: El Parque Nacional Torres del Paine (PNTP) se caracteriza por ser un área geográfica representativa de los ecosistemas del mundo, al contener una alta belleza paisajística y amplia diversidad de ecosistemas. El objetivo de este trabajo es analizar las tendencias espacio temporales de la vegetación en el PNTP 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 2005 y 2010 y el mapa de cobertura de suelo de Chile continental del 2014. Además, se utilizaron los productos de "Soil Moisture and Ocean Salinity" (SMOS), y datos meteorológicos de la estación meteorológica Torres del Paine para analizar las condiciones ambientales que presentó el parque mientras ocurría el incendio de los años 2011-2012. Para determinar la magnitud de los cambios de la vegetación afectada por incendio del PNTP se realizó un análisis no paramétrico de la tendencia del índice "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) de MODIS en el periodo 2002 a 2016 y el índice "Normalized Burn Ratio" (NBR) para los incendios de los años 2005 y 2011-2012. Los resultados muestran que los incendios 2005 y 2011-2012 afectaron a más de 30.000 hectáreas del Parque Nacional, siendo las coberturas de "Matorral" y "Bosque" las más afectadas debido a su alto nivel de severidad y su regeneración menor al 56% de la superficie afectada. En cuanto a la humedad de suelo esta no supera los 20% m^3m^{-3} antes del incendio y las precipitaciones no superan los 101 mm durante los días de incendio lo que se relaciona con un aumento en las probabilidades de propagación del incendio. En este trabajo se evidencia que la teledetección puede ser utilizada en la gestión de incendios y así resguardar los parques nacionales con el fin de preservar y conservar la flora, fauna y belleza paisajística de Chile.

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

Trend in vegetational cover affected by fire in the Torres del Paine National Park

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. The aim of this work is to analyze the spatial and temporal trends of vegetation at PNTP using remote images from the Landsat platforms, the MOD13A3 product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), coverage maps surface Global Land cover Maps of ESA/CCI 2005 and 2010 and a land cover map of continental Chile of 2014. In addition, the products of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) and meteorological data from the Torres del Paine meteorological station were used to analyze the environmental conditions that presented the park while the fire occurred the years 2011-2012. To determine the magni-

To cite this article: Rivera, C., Mattar, C., Durán-Alarcón, C. 2017. Trend in vegetational cover affected by fire in the Torres del Paine National Park. *Revista de Teledetección*, 50, 71-87. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7422>

* Autor para la correspondencia: carolina.rivera@ug.uchile.cl

tude of the changes of vegetation affected by fire at PNTP a nonparametric trend analysis was use with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of MODIS from 2002 to 2016 and the Normalized Burn Ratio (NBR) for the fire occurred the year 2005 and the years 2011-2012. The results show that between both fires it is been affected more than 30.000 hectares of the national park, being the "Scrub" and "Forest" coverage the most affected due to the high level of severity and the low regeneration of the burn area (less than 56%). The soil moisture does not exceed 20% m^3m^{-3} before the fire and the rainfall does not exceed 101 mm during the days of fire, which is related to an increase in the probability of propagation of the fire. In this work is possible to realize that remote sensing can be used in the fire management to regard the national parks with the objective of preserve and conserve the flora, fauna and scenic beauty of Chile.

Key words: Torres del Paine National Park, NBR, NDVI, soil moisture, burned area.

1. Introducción

La Patagonia chilena se caracteriza por tener gran importancia para la biosfera, ya que es uno de los lugares en donde existe una importante reserva de vida silvestre por su diversidad de ecosistemas y sus características bióticas, climáticas y geomorfológicas (Delgado *et al.*, 2013). Una de estas zonas corresponde al Parque Nacional Torres del Paine (PNTP), creado inicialmente en 1959, ampliado a más de 240 mil hectáreas en 1962 y declarado Reserva de la Biósfera en 1978 por la UNESCO por ser un área geográfica representativa de los ecosistemas del mundo y por su belleza paisajística (UNESCO, 2015).

En Chile, los incendios forestales se han incrementado en las últimas dos décadas principalmente debido a causas antrópicas (Úbeda y Sarricolea, 2016). Para el caso de los Parques Nacionales, el riesgo de incendio ha incrementado debido a la visita masiva de turistas, lo que incrementa su vulnerabilidad. De hecho, las características paisajísticas y ecológicas han transformado al PNTP en una atracción con alta demanda turística el cual recibió 252.447 personas en el año 2016 (CONAF, 2016a). Esto ha generado un gran impacto en el paisaje del PNTP, incrementando la susceptibilidad a los eventos de causa antrópica tales como incendios (Repetto y Cabello, 2015). Los incendios más importantes han acontecido en 1985, 2005 y 2011-2012 transformando algunos ecosistemas a semi-naturales, con dominancia de especies colonizadoras post-incendio (Contreras e Irrazabal, 2010; Mattar *et al.*, 2012; Vidal y Bauk, 2014). El incendio de 1985 ocurrió el 10 de febrero y afectó aproximadamente 15.000 ha¹. El incendio ocurrido en el 2005 afectó la zona de desembocadura 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 debido a la inaccesibilidad del lugar y a vientos superiores a los 100 km h⁻¹, tuvo una duración de 70 días y afectó más de 18.000 ha (Mattar *et al.*, 2012).

Una de las herramientas utilizadas para caracterización del área afectada por un incendio así como la predicción y gestión del impacto de incendios forestales es la teledetección (Chowdhury y Hasan, 2015). La teledetección se puede aplicar en tres grandes fases: determinación de condiciones de peligro, detección de focos activos y evaluación de daños (Chuvienco, 2009; Chuvienco *et al.*, 2010). Durante la fase de determinación de las condiciones de peligro de incendio se debe considerar el peligro o probabilidad de ocurrencia de incendios y la vulnerabilidad del lugar. Los factores que se consideran son la humedad del suelo, el contenido de agua y las propiedades estructurales de la vegetación, la topografía del lugar, entre otras. 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 de incendios (Chuvienco, 2003; Chuvienco *et al.*, 2004). En la detección de focos activos la teledetección permite identificar las anomalías térmicas, a partir de la temperatura de superficie, la cual es crítica para 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, en la evaluación de daños producto de un incendio, se pueden

¹ Mimica, J. Consulta ciudadana OIRS, CONAF. 2016.

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 (Chuvieco, 2009; Cocke *et al.*, 2005; Ruescas *et al.*, 2010).

En este trabajo se han utilizado los índices de vegetación índice normalizado de la vegetación (NDVI) e índice normalizado de área quemada (NBR), para el análisis de la cobertura vegetal post-incendio en el PNTP utilizando datos de teledetección ya que esta información todavía es escasa y se desconoce la tendencia de la vegetación derivada del impacto que tuvieron los incendios en esta área natural protegida. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es estimar y analizar las tendencias espaciales y temporales de la vegetación en el PNTP con especial énfasis en las zonas afectadas por el incendio del 2005 y 2011-2012 utilizando índices de vegetación y área quemada a partir de datos de teledetección.

2. Área de estudio y Datos

2.1. Parque Nacional Torres del Paine

El PNTP pertenece a la Comuna Torres del Paine, Provincia Ultima Esperanza, Región de Magallanes y la Antártica chilena, Chile. Se ubica entre las latitudes 49°21' a 51°08' y las longitudes 73°07' a 74°00'. Tiene una superficie de 242.000 ha y su elevación varía entre los 100 y 2.500 m.s.n.m. Además cuenta con terrenos planos y ondulados en la parte este y en el lado oeste se encuentran superficies con pendientes sobre 45%, las cuales conforman un 15% de la superficie total del parque (CONAF, 2007; Pisano, 1974; Decreto N° 1050/1962). 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 el clima de estepa árido, con una temperatura media anual de 18°C (CONAF, 2007; Kottek *et al.*, 2006). La precipitación media anual de 790 mm/año, sin estación seca (CR2, 2016) (Figura 1).

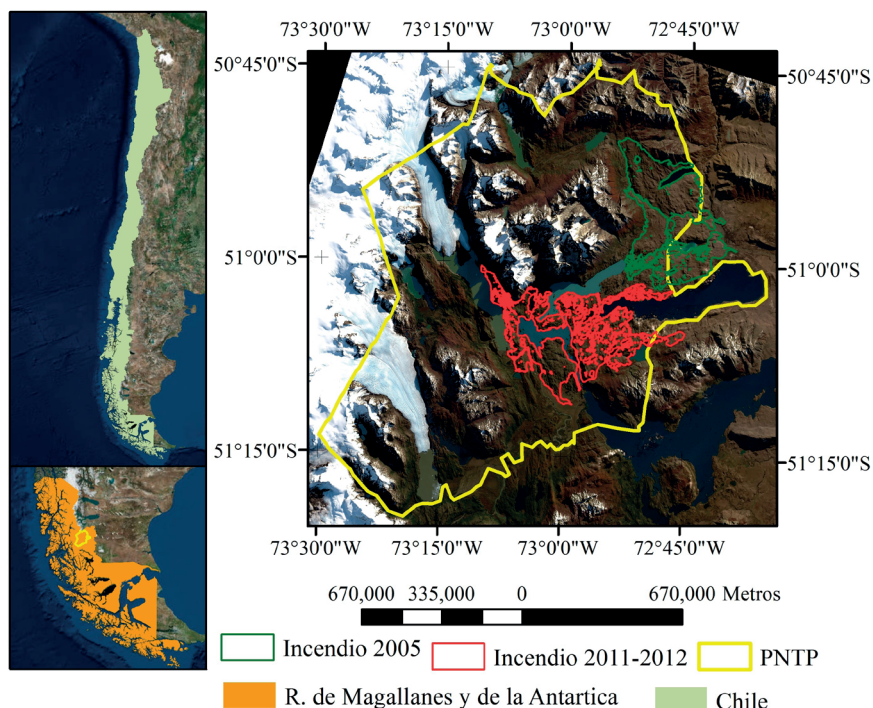


Figura 1. Parque Nacional Torres del Paine, su ubicación en el territorio nacional y las áreas afectadas por incendio del año 2005 (verde) y 2011-2012 (rojo).

En el PNTP existen cuatro formaciones vegetacionales, las cuales son Matorral pre-andino, Bosque magallánico de hoja caduca, Estepa Patagónica y Desierto andino, siendo *Nothofagus pumilio* (Lenga) una de las especies representativas de la vegetación del PNTP (Gajardo, 1994; Domínguez et al., 2006; Pisano, 1974). Además, existe un total de 450 especies de flora, 85 de ellas son introducidas, (Domínguez et al., 2006; SIIT, 2015), y 34 especies introducidas se encuentran en áreas afectadas por incendios (Vidal et al., 2015). En cuanto a la fauna, es más diversa en humedales, matorral y bosques, en comparación con ambientes de Desierto andino y glaciares. Algunas especies presentes son *Hippocamelus bisulcus* (Huemul), *Puma concolor* (Puma) y *Liolaemus magallanicus* (Lagartija magallánica) (CONAF, 2007). Debido a lo anterior, el PNTP se ha transformado en una atracción con alta demanda turística, en donde se pueden realizar diversas actividades turísticas como caminatas, navegaciones, entre otras (CONAF, 2016b; 2016c; 2016d).

2.2. Landsat

En este trabajo se utilizó información de reflectancia de superficie derivada de Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ y Landsat-8 OLI entre los años 2000 al 2011, 2000 al 2013 y 2013 al 2016, respectivamente. 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 L8 OLI (USGS, 2015b). Como criterio de selección para estas imágenes, se determinó que la escena no debía estar cubierta por más de un 50% de nubes.

2.3. MODIS

Se utilizaron series temporales de los años 2002 a 2016 del producto MOD13A3 correspondiente al "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI), que representa la diferencia entre los valores normalizados de reflectancia de las bandas Infrarrojo cercano (NIR) y Rojo (R) (LPDAAC, 2015; Rouse et al., 1974). Estos productos

presentan una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal mensual. Este producto NDVI es desarrollado con un proceso que elimina cuerpos de agua, nubes, sombras de nubes y los efectos de aerosoles (Huete et al., 2002). Además, las imágenes MODIS han sido corregidas atmosféricamente y se ha eliminado el porcentaje de cobertura de nubes.

2.4. Imágenes de humedad del suelo

Con el fin de determinar las condiciones de humedad del suelo correspondiente al incendio de los años 2011-2012 en el PNTP se utilizaron imágenes de humedad del suelo generados por SMOC-BEC (<http://cp34-bec.cmima.csic.es/>) (Piles et al., 2011). Estos productos de humedad del suelo son 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 una resolución espacial de 43 km, para los años 2010 a 2016, los cuales han sido utilizados como herramienta para el manejo de incendios (SMOS-BEC Team, 2014a). Con este producto se ha demostrado que condiciones previas al fuego incluyen valores bajos de humedad del suelo y altas temperaturas (Chaparro et al., 2014; SMOS-BEC Team, 2014b).

2.5. Datos cartográficos y meteorológicos

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 (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 una cartografía de usos del suelo 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. Finalmente, se utilizaron datos de precipitación mensual (mm) de los años 2011-2012 de la estación meteorológica de Torres del Paine ubicada en 51° 11' 03" S; 72° 58' 01" O. Todos los datos utilizados en este trabajo se encuentran descritos en el Anexo 1.

3. Metodología

3.1. Estimar la tendencia del vigor de la vegetación afectada por los incendios

Con el fin de analizar el índice de vegetación en el PNTP se realizó una máscara del área de estudio utilizando el “Global Land Cover Maps” de ESA/CCI de los años 2005 y 2010, para todas las imágenes MODIS disponibles entre los años 2002 a 2016, excluyendo 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. Posteriormente, se calcularon las anomalías de NDVI 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.

Una vez calculadas las anomalías, se debe estimar la tendencia del vigor de la vegetación mediante el método de 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. 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 estimó un promedio correspondiente a la tendencia paramétrica.

En la Ecuación 4 se presenta el estadístico t 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 (Sen, 1968).

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

Para calcular el estadístico z se utilizó la Ecuación 7.

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

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 $[z_{0,025}; z_{-0,025}]$ de la hipótesis nula $t = 0$, que representa la inexistencia de tendencia.

3.2. Analizar los cambios 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). Aquellas imágenes Landsat 7-ETM+ que presentaban bandeado debido al efecto SLC-off, fueron corregidas mediante una interpolación para cubrir aquellos pixeles sin datos (Zhang et al., 2007; Pringle et al., 2009).

Con el fin de estimar los cambios de vegetación por cada una de las coberturas vegetacionales del PNTP, se realizó una máscara de vegetación basado en la clasificación de Zhao et al. (2016), para todas las imágenes Landsat entre los años 2004 a 2016, excluyendo cuerpos de agua, glaciares, macizos montañosos, entre otros. La resolución espacial de esta máscara es de 30×30 m y consta de las clasificaciones “Bosque”, “Cultivos”, “Pastizales”, “Matorral”, “Humedal”, “Cuerpos de agua”, “Superficies impermeables”, “Tierras desnudas” y “Hielo y nieves”.

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 utilizó el índice “Normalized Burned Ratio” (NBR) (Ecuación 8) (Key y Benson 2006; Escuin et al., 2008), para obtener áreas que hayan sido afectadas por incendios, caracterizar el grado de impacto de las áreas quemadas y su posterior regeneración.

$$NRR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \tag{8}$$

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 con el fin de analizar la severidad y el grado de regeneración por clase de vegetación (Ecuación 9).

$$\Delta NBR = NBR_{pre-incendio} - NBR_{post-incendio} \tag{9}$$

Los resultados de esta diferencia se clasifican según nivel de severidad (Tabla 1), los cuales fueron analizados a escala temporal.

Tabla 1. 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. Las áreas quemadas toman valores positivos o negativos, dependiendo de si el fuego daña el sitio o permite que mejore la productividad de este (Key y Benson, 2006).

Para complementar el estudio de las variaciones de la vegetación, se estimó la media y desviación estándar del índice NDVI para todas las imágenes de Landsat y se analizaron las diferencias de las series temporales. Luego, se realizó un análisis de los resultados obtenidos del índice NDVI, de los dos periodos en los cuales han ocurrido incendios en el PNTP, en el cual se estudió la variación de la vegetación en las áreas afectadas por los siniestros. Adicionalmente, se analizaron las condiciones ambientales del parque en el periodo del incendio de los años 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 de los años 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.

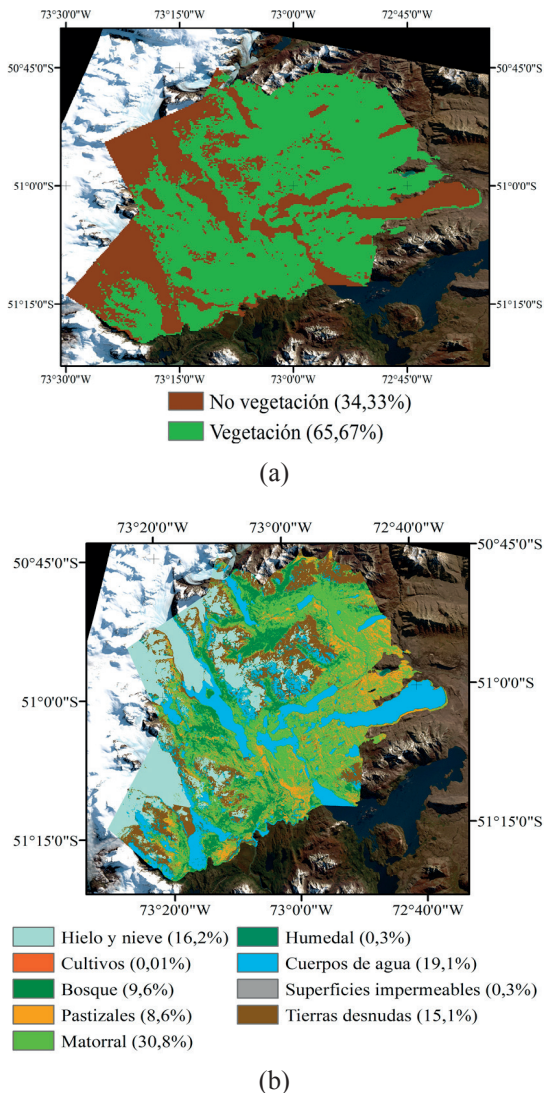


Figura 2. (a) Máscara de vegetación y no vegetación de ESA/CCI (b) Máscara de vegetación de Zhao *et al.* (2006) reclasificada en el área de estudio, con sus respectivos porcentajes de cobertura en el área de estudio.

4. Resultados

4.1. Tendencia del vigor de la vegetación afectada por los incendios

Las tendencias de vegetación para MODIS y Landsat (5, 7 y 8) utilizaron las clasificaciones de cobertura vegetal del PNTP según la cartografía de ESA/CCI (Figura 2 a) y Zhao *et al.* (2016) (Figura 2 b), respectivamente. Para el caso de ESA/CCI se consideraron como coberturas vegetacionales las clasificaciones de “Vegetación” y

“No vegetación”. Por otra parte, en la cartografía de Zhao *et al.* (2016), se consideraron las clasificaciones “Bosque”, “Cultivos”, “Pastizales”, “Matorral” y “Humedal”.

A partir de la máscara de vegetación realizada con las coberturas reclasificadas de ESA/CCI, se estimaron las tendencias de la anomalía de NDVI entre el 2002 y el 2016 (Figura 3). Las tendencias espaciales de NDVI (Figura 3 a) muestran un aumento de su vigor con una significancia estadística ($p\text{-value}<0,05$) en las zonas que no fueron afectadas por el incendio del parque nacional tanto en 2005 como en 2011-2012. Las dos zonas que experimentaron una tendencia negativa están principalmente ligadas al impacto de los incendios del 2005 y 2011-2012. Asimismo, 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 afectaría las fases fenológicas de la vegetación en zonas de acumulación y donde existe un acentuado derretimiento en épocas estivales.

La anomalía del NDVI y su respectiva variación durante los últimos 16 años se muestra en la Figura 3 (b), en la cual el vigor de la vegetación en el PNTP no ha presentado ninguna variabilidad significativa ($p\text{-value}<0,05$) y 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 los productos de vegetación derivados de MODIS.

4.2. Cambios en la vegetación posterior a los incendios

En la Figura 1 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 no está mayoritariamente cubierta por vegetación boscosa ni matorrales. Por su parte, el incendio ocurrido en 2011-2012 fue en las cercanías de Lago Grey, afectando principalmente una zona boscosa (e.g. *Nothofagus pumilio*). Ambas zonas cubren más

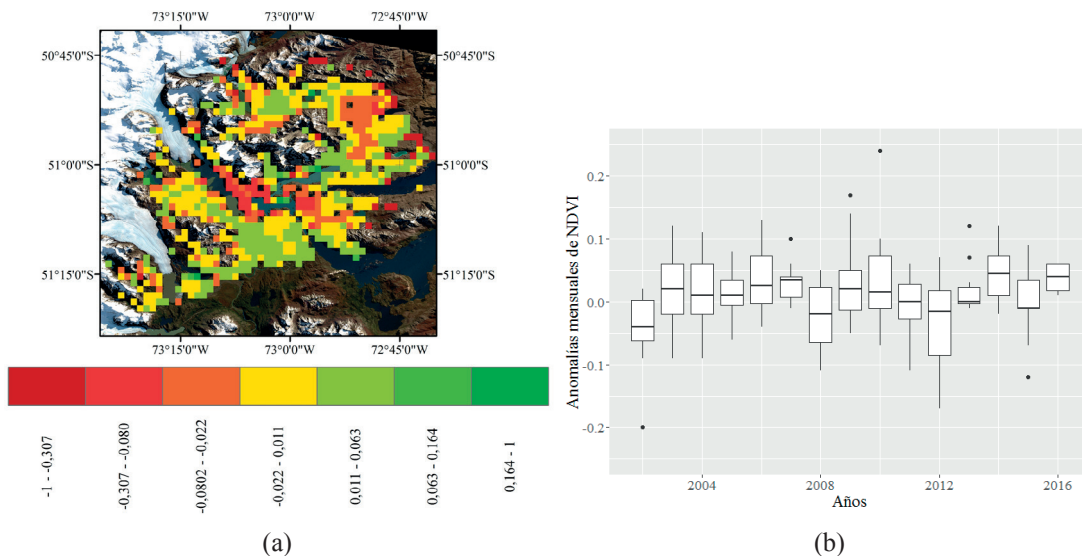


Figura 3. (a) Tendencia de la anomalía mensual de NDVI, durante los últimos 16 años a partir del producto MOD13A3 y (b) Anomalías mensuales de NDVI.

de 30 mil hectáreas donde se encuentran la mayor parte de los senderos de *trekking* más transitados del parque y son las que tiene mayor riesgo de combustibilidad. A continuación se detallan las coberturas afectadas para cada uno de los incendios ocurridos en el PNTP.

4.2.1. Incendio del 2005

En el incendio del 2005 la superficie de vegetación afectada se estimó en 15.628 ha, en la Figura 4 muestra el grado de severidad y regeneración para el área afectada por el incendio. En el ΔNBR 2004-2005 es posible apreciar diferencias significativas ($p < 0.05$) en los tipos de crecimiento (Alto y Bajo) totalizando más de 476 ha (30.46%). El tipo de clasificación “No quemado” fue superior al 20% del área siniestrada, lo que implica que existe un cambio regenerativo 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 quemadas. Para la comparación de ΔNBR 2004-2016, la superficie de las clasificaciones “Alto crecimiento post incendio”, “Bajo crecimiento post incendio” y “No quemado” aumentaron alcanzando un 95.6% del área siniestrada. No obstante, aún existen zonas

clasificadas con grados de severidad totalizando 691,92 ha.

La Figura 5 muestra el criterio de crecimiento según las coberturas afectadas por el incendio 2005. Para la cobertura de “Bosque”, se presenta 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”, se evidencia un aumento sostenido de la regeneración a partir del 2013 con un fuerte efecto estacional para el 2012. Esto se puede atribuir a los eventos pluviométricos del año (938 mm en total), lo 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 de la clasificación “Área quemada de severidad alta”. Así mismo, la clasificaciones de alto y bajo crecimiento experimentaron un aumento a partir del 2012 (posiblemente atribuible al efecto pluviométrico estacional). En el caso de “Matorral”, las clasificaciones “Área quemada de severidad baja, media alta y severidad alta” alcanzan una superficie de 8.894 ha afectadas. 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

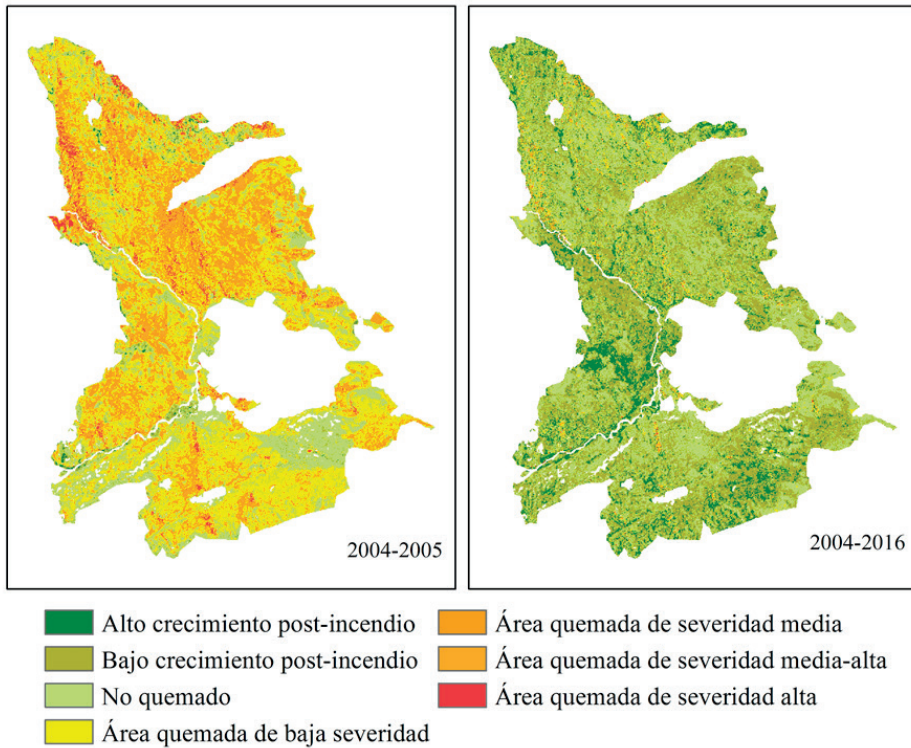


Figura 4. Imagen de ΔNBR entre los años 2004 y 2005 y entre los años 2004 y 2016.

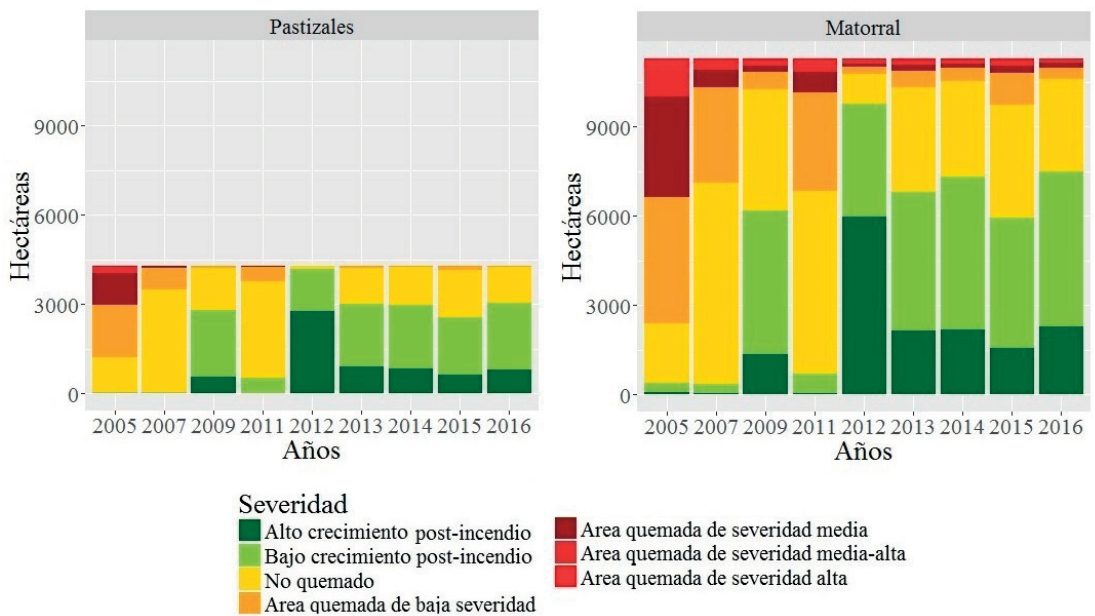


Figura 5. Superficie afectada según nivel de severidad, para las coberturas de vegetación indicadas en el incendio del año 2005. El resto de las coberturas no se incluyen en el gráfico debido a que presentan menos de 30 ha y no es posible visualizarlas.

“Pastizales” y “Cultivo”, se evidenció un fuerte crecimiento a partir del año 2012. Finalmente, para la clasificación “Humedal”, se observó un crecimiento sostenido de esta cobertura así como una disminución de superficie clasificada como “Área quemada de severidad alta” y “Área quemada de severidad media alta”.

4.2.2. Incendio del 2011-2012

En el incendio del 2011-2012 la superficie de vegetación afectada aparece detallada en Mattar et al. (2012). La Figura 6 muestra el grado de severidad y regeneración estimado para el área afectada. En el ΔNBR 2011-2013 las categorías de crecimiento post incendio alcanzan un total de 8.528 ha (52% del área siniestrada), seguido de la categoría “No quemado” 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.

La Figura 7 muestra los niveles de severidad de ΔNBR según las coberturas afectadas por el

incendio de los años 2011-2012. Las categorías de crecimiento post incendio y “No quemado” de la cobertura “Bosque” presentan un cambio regenerativo positivo significativo donde la superficie se duplica desde el año 2013 al 2016. La superficie de área quemada con distintos niveles de severidad disminuye, aunque permanecen sectores afectados. En la cobertura “Cultivos”, las categorías de crecimiento y la categoría “No quemado” aumentan un 50% aprox. y las categorías de áreas quemadas presentan una tendencia negativa. En la cobertura “Pastizales” las categorías de área quemada disminuyen, llegando a tener sólo 6,44 ha en el año 2016. En el caso de “Matorral”, es la cobertura con mayor superficie afectada, totalizando 3.224 ha. 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 la Figura 8 se presenta una serie temporal de NDVI del área total del parque, incendio del 2005 e incendio del 2011-2012, respectivamente. El NDVI en el área del parque se muestra una disminución en los años posteriores al incendio del 2005 y el 2011-2012. Esta disminución fue en promedio un 10% en ambos incendios, debido a que

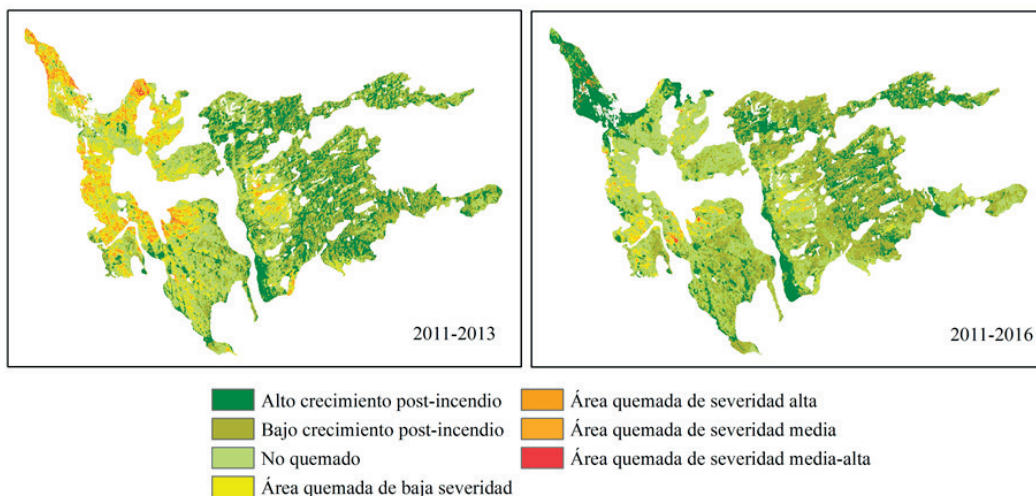


Figura 6. Imagen de ΔNBR , entre los años 2011 y 2013, y entre los años 2011 y 2016.

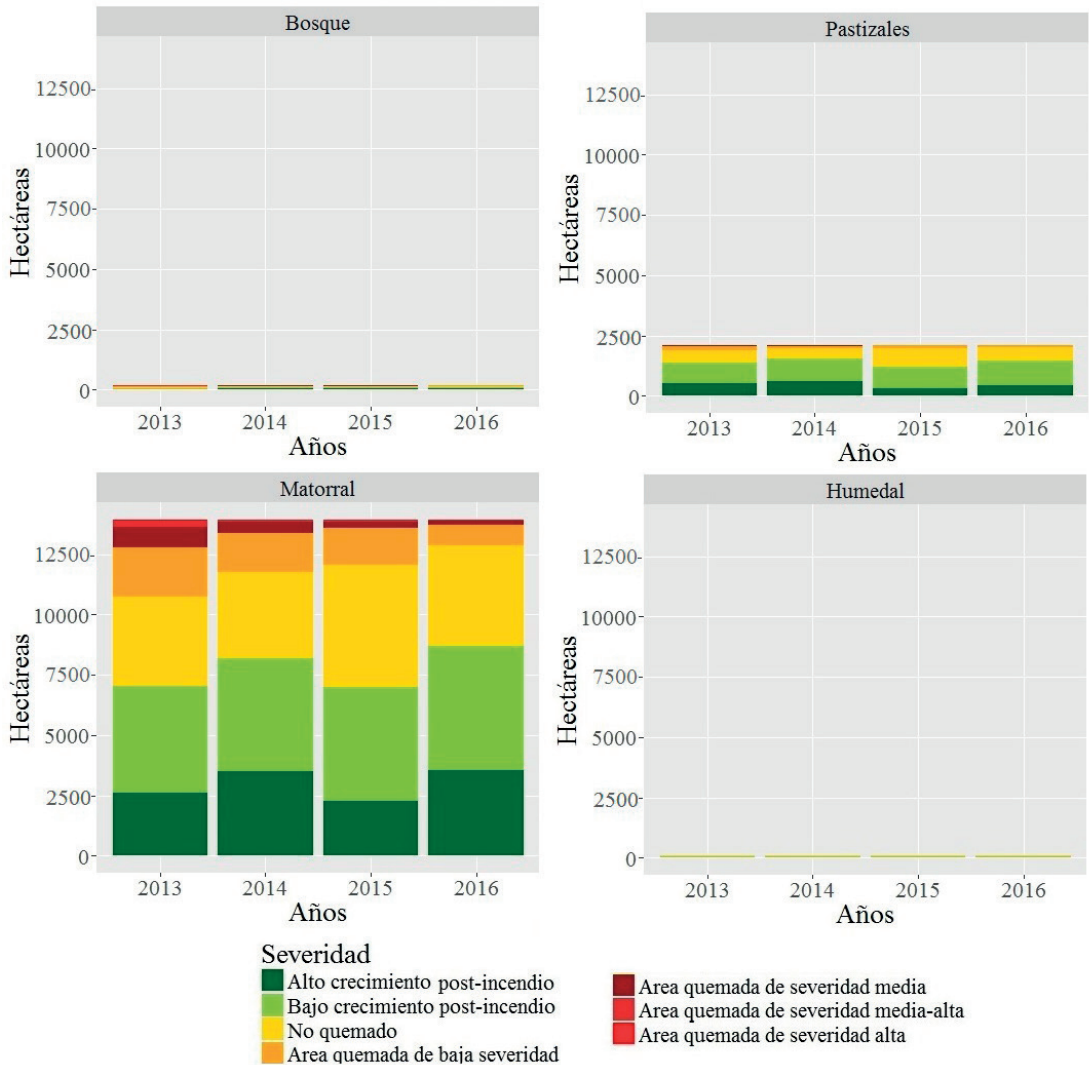


Figura 7. Superficie afectada según nivel de severidad, para las coberturas de vegetación indicadas, en el incendio del año 2011. El resto de las coberturas no se incluyen en el gráfico debido a que presentan menos de 30 ha y no es posible visualizarlas.

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 2016 el NDVI aumentó 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 de los años 2011-2012, se aprecia una variación menor al 6% posiblemente debido a factores estacionales como la pluviometría de la zona. Sin embargo, se evidencia una fuerte disminución del vigor de la vegetación provocado por el incendio del 2011-2012, equivalente a un 23%; aunque se presenta un fuerte aumento del NDVI (35% aprox.) para el año 2013.

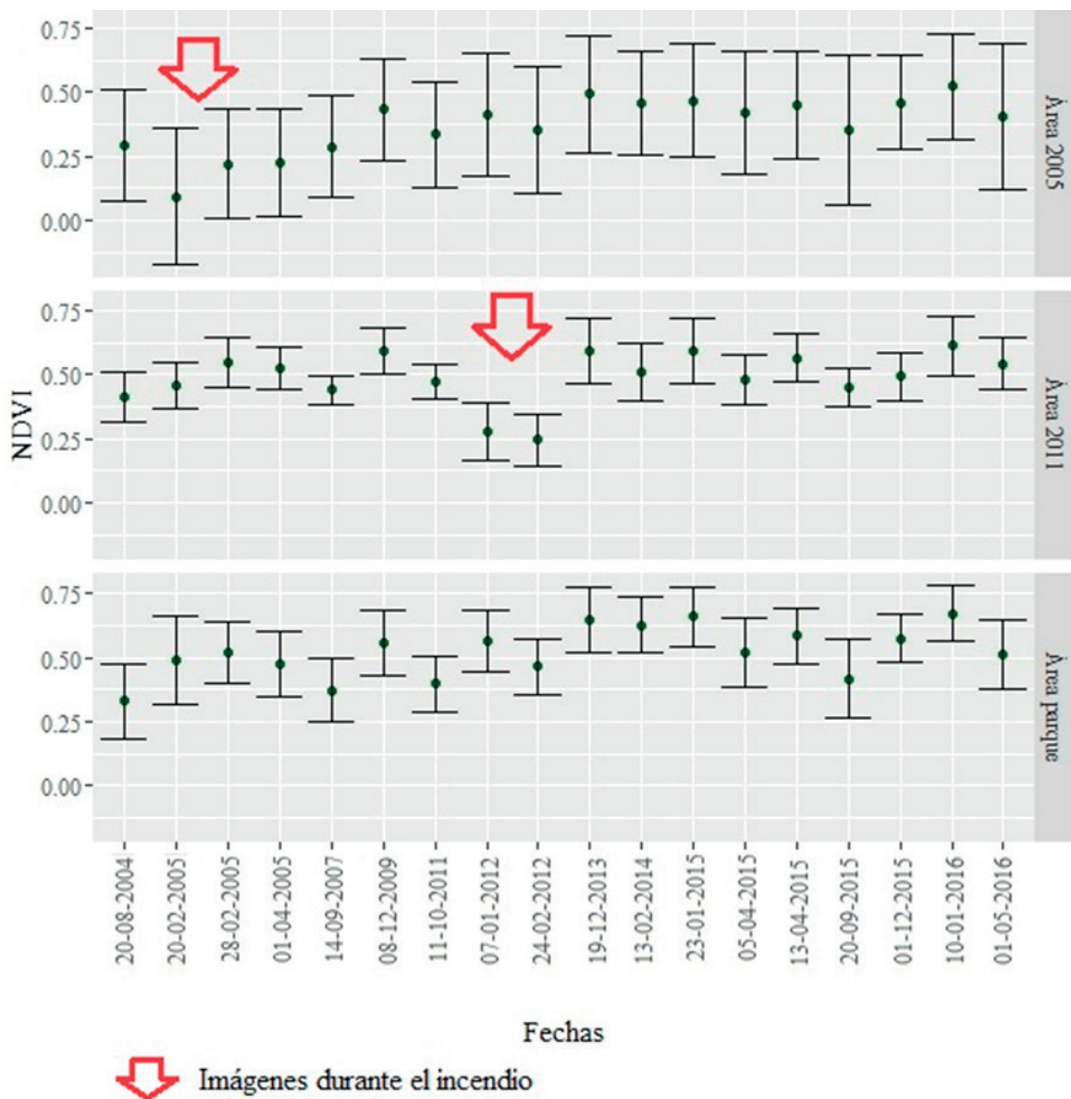


Figura 8. Serie temporal de NDVI y desviación estándar en el área afectada por el incendio del 2011 a partir de imágenes Landsat (Las imágenes no cuentan con una temporalidad homogénea debido a que se han seleccionado sólo aquellas cuya cobertura de nubes es menor a 50%).

En cuanto al análisis de humedad de suelo y las precipitaciones, la Figura 9 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 del 2011 y 31 de enero del 2012, con el fin de identificar las variaciones antes y durante el incendio. La humedad del suelo presenta valores que no superan el $20\% \text{m}^3\text{m}^{-3}$ durante los dos meses, siendo el menor valor registrado un $6\% \text{m}^3\text{m}^{-3}$ 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 totalizaron 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). Es importante destacar que de 71 días durante los que se incendiaba el parque (27 de diciembre del 2011 al 6 de marzo del 2012), llovió 29 días (110,6 mm), lo que podría haber aumentado las probabilidades de propagación.

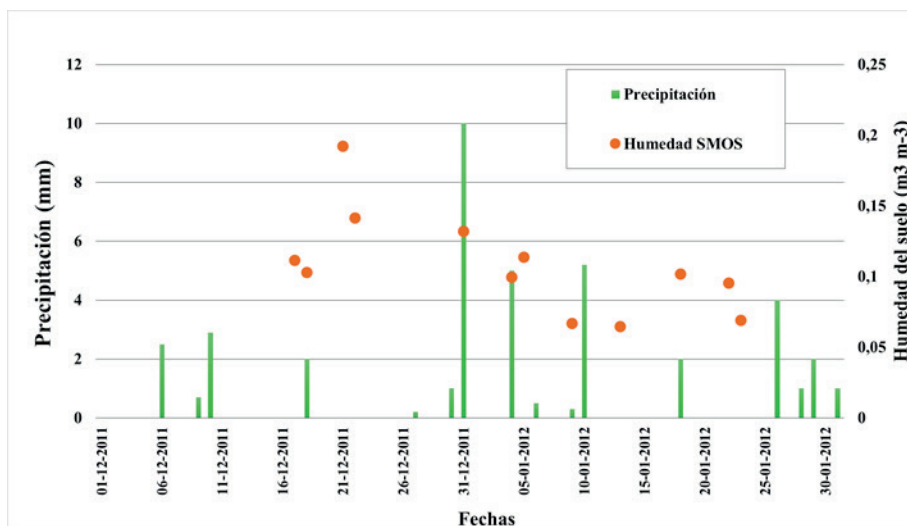


Figura 9. Valores de Humedad de suelo (naranja) y precipitaciones (barras verdes) registradas por la estación meteorológica Torres del Paine para el incendio de los años 2011-2012.

5. Discusión

En el PNTP el fuego no es un componente natural y la falta de resiliencia a los incendios provoca que los bosques no vuelvan a regenerarse en un corto plazo y que parches de estepa patagónica queden expuestos y susceptibles a especies invasoras (Vidal, 2012). Es por esto que 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 de los años 2011-2012 con el fin de analizar la regeneración de la vegetación afectada. La información disponible para el año 1985 no pudo ser considerada debido a la ubicación del incendio y la alta proporción de nubes sobre la única escena cercana a la fecha del incendio. Así mismo, las imágenes post incendio superan los cuatro meses debido a las condiciones meteorológicas que cubren las imágenes del parque, lo que puede provocar la mitigación de los efectos del fuego por la regeneración natural de la vegetación.

A pesar de que ambos incendios afectaron grandes superficies, el vigor de la vegetación correspondiente al área del PNTP no se ve fuertemente afectado, 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 PNTP. 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 aún mayor al evidenciado en este y otros trabajos previos.

En Chile, la Corporación Nacional Forestal (CONAF) posee ciertas plataformas que han sido utilizadas en diversos incendios forestales para evitar su propagación, ya que entrega un mapa de riesgo interactivo al público (e.g. CARTO, FIRMS). Sin embargo, es necesario mejorar diversos aspectos ligados con la resolución espacial de los datos entregados (2x2 km), la generación de cartografías preventivas en base a humedad del suelo, uso de tecnología radar para evitar impacto de nubes sobre los incendios, entre otras. Esto con el fin de evitar futuros desastres naturales como el ocurrido en el Parque Nacional Torres del Paine a partir del uso sinérgico de datos de teledetección. Por último, es necesario mencionar que para relacionar los indicadores de intensidad y/o severidad de un incendio se deben realizar futuros esfuerzos de colección de datos de terreno para validar los datos obtenidos mediante teledetección.

6. 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 y el incendio ocurrido entre diciembre del 2011 y marzo del 2012. 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 de área quemada ΔNBR que identifica las variaciones de áreas quemadas, aunque puede ser afectado por factores como las precipitaciones y la humedad del suelo.

Los resultados muestran que para ambos incendios se evidenciaron tendencias de crecimiento positivas para diferentes coberturas vegetacionales. La cobertura “Matorral” fue la más afectada en ambos incendios y la cobertura “Bosque” afectada por el incendio del 2005. De estas coberturas afectadas sólo se ha recuperado en un 56%. Por otra parte, el análisis de tendencias de las anomalías del índice de vegetación determinó un aumento del vigor en zonas que no fueron afectadas por incendios y cambio abrupto del NDVI en las fechas 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, así como el comportamiento de las variables humedad del suelo y precipitación. Con esto se pueden generar análisis y cartografías de riesgos de incendio de forma actualizada a partir de información remota disponible en diversas plataformas *on-line* y de acceso gratuito. Esta entrega de información, 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.

Agradecimientos

Gracias al proyecto Conicyt – Fondecyt Iniciación 11130359 “*Estimating the Surface*

soil moisture at regional scale by using a synergic optical-passive microwave approach and remote sensing data”, a United States Geological Survey (USGS) por el libre acceso a los datos Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ y Landsat-8 OLI, a la National Aeronautics and Space (NASA) por los productos MODIS y la Dra. María Piles por los productos de humedad de suelo SMOS.

Referencias

- Chaparro, D., Vayreda, J., Martínez-Vilalta, J., Vall-llossera, M., Banqué, M., Camps, A. y Piles, M. 2014. SMOS and climate data applicability for analyzing forest decline and forest fires. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014 IEEE International*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946613>
- Chaparro, D., Vall-llossera, M., Piles, M., Camps, A. y Rüdiger, C. 2015. Low soil moisture and high temperatures as indicators for forest fire occurrence and extent across The Iberian Peninsula. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015 IEEE International*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326530>
- Chowdhury, E. y Hassan, Q. 2015. Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.011>
- 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. <https://doi.org/10.1142/5364>
- Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, P., Martínez-Vega, J., De la Riva, J. y 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.019>
- Chuvieco, E., Giglio, L. y Justice, C. O. 2008. Global characterization of fire activity: Towards defining fire regimes from earth observation data. *Global Change Biology*, 14, 1488-1502. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01585.x>
- 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.

- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M.P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J., Herrera, M. y Zamora, R. 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221(1), 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>
- Claverie, M., Vermote, E., Franch, B. y Masek, J. 2015. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ surface reflectance products. *Remote Sensing of Environment*, 169, 390-403. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.030>
- Cocke, A. E., Fulé, P. Z. y 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. <https://doi.org/10.1071/WF04010>
- 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: 2016. Gerencia de Áreas Protegidas y Medio Ambiente Unidad de Planificación y Control de Gestión. 3 p.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016b. Senderismo. Último acceso 01 de marzo, 2017, de <http://www.parquetorresdelpaine.cl/es/senderismo>.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016c. Que hacer en el parque. Último acceso 01 de marzo, 2017, de <http://www.parquetorresdelpaine.cl/es/que-hacer-en-el-parque>.
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2016d. Caminata en hielo. Último acceso 01 de marzo, 2017, de <http://www.parquetorresdelpaine.cl/es/caminata-en-hielo>.
- Contreras, S. e Irrazabal, P. 2010. Disturbance habitats effects on mammal species in Torres del Paine National Park and Biosphere Reserve, Magallanes Region, Chile, Mab Young Scientists Awards. UNESCO. 2009. 51 pp.
- CR2 (Center for climate and resilience research). 2016. Datos de precipitación. Último acceso 01 de marzo, 2017, de <http://www.cr2.cl/recursos-y-publicaciones/bases-de-datos/datos-de-precipitacion/>.
- Csiszar, I., Denis, L., Giglio, L., Justice, C. O. y Hewson, J. 2005. Global fire activity from two years of MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*, 14, 117-130. <https://doi.org/10.1071/WF03078>
- 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. 2 p.
- Delgado, L., Sepúlveda, M. y Marín, V. 2013. Provision of ecosystem services by the Aysén watershed, Chilean Patagonia, to rural households. *Ecosystem Services*, 5, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.04.008>
- Domínguez, E., Elvebakk, A., Marticorena, C. y Pauchard, A., 2006. Plantas introducidas en el Parque Nacional Torres del Paine, Chile. *Gayana Botánica*. 63(2), 131-141. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432006000200001>
- Dwyer, E., Pereira, J. M. C., Grégorie, J.-M. y Dacamara, 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. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00339.x>
- ESA. 2016. Climate change initiative Land cover newsletter. *Land Cover CCI Newsletter*, 8.
- Escuin, S., Navarro, R. y Fernández, P. 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. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- 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. y Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Kendall, M. G. 1975. *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin: London.
- 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 D.C., R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson, & LJ Gangi (eds) FIREMON: fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report RMRS-GTR-164-CD: 1-51.

- Korontzi, S., Mccarty, J., Loboda, T., Kumar, S. y 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. <https://doi.org/10.1029/2005GB002529>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. y Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- LPDAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center). 2015. MODIS Products Table. USGS. Último acceso 01 de marzo, 2017, de https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table.
- 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. Último acceso: diciembre de 2017, de http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_04.pdf
- Navarro, R., Hayas A., García-Ferrer A., Hernández Clemente, R., Duhalde P. y González, L. 2008. Caracterización de la situación pos incendio 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. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2008000100008>
- Navarro R., Olave, F., Hayas, F. y Castillo, M. 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-686X2015000100005>
- 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. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2120615>
- 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. y Muir, J. S. 2009. Geostatistical interpolation of SLCOFF Landsat ETM+ images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6), 654-664. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.001>
- 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-686X2015000100009>
- 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. y 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. <https://doi.org/10.1080/01431160903369592>
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- SIIT (Sistema Integral de Información Territorial). 2015. Clima y Vegetación Región de Magallanes. Biblioteca Nacional de Chile.
- SMOS-BEC Team (SMOS-Barcelona Expert Center). 2014a. SMOS-BEC Ocean and Land Products Description. 22 p.
- SMOS-BEC Team (SMOS-Barcelona Expert Center). 2014b. Fire risk maps. Último acceso 01 de marzo, 2017, de http://www.smos-bec.icm.csic.es/fire_risk_maps.
- Úbeda, X. y Sarricolea, P. 2016. Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*, 146, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.004>
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2015. Chile, Torres del Paine. Último acceso: 01 de marzo, 2017, de http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/sc_mab_TorresdelPaine_EN.pdf.
- 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). 2015b. Product Guide Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Product. 27p
- Vidal, O. 2012. Incendio en Torres del Paine. *Patagon Journal*. Último acceso: 01 de marzo, 2017 en de <http://www.patagonjournal.com/15/January/2015>.
- Vidal, O. J y 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., Aguayo, M., Niculcar, R., Bahamonde, N., Radic, S., San Martín, C., Kusch, A., Latorre, J. y Félez, J. 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. <https://doi.org/10.4067/S0718-686X2015000100006>
- Zhang, C., Li, W. y 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. <https://doi.org/10.1080/01431160701250416>
- Zhao, Y., Feng, D., Yua, L., Wang, X., Chen, Y., Hernández, H.J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G., Radke, J. y n 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

Anexo 1

Anexo 1. Características de los datos utilizados.

	ID	Date	Path-row/ Swatch	Cloud cover (%)	Resolución espacial	Resolución temporal
Landsat-5 TM	LT52300962004233COA00	20-08-2004	230-96	34,00	30 m	16 días
	LT52300962005059COA00	28-02-2005	230-96	27,32	30 m	16 días
	LT52300962005091COA00	01-04-2005	230-96	26,86	30 m	16 días
	LT52300962007257COA00	14-09-2007	230-96	18,03	30 m	16 días
	LT52300962009342COA00	08-12-2009	230-96	47,27	30 m	16 días
	LT52300962011284COA00	11-10-2011	230-96	23,00	30 m	16 días
Landsat-7 ETM+	LE72300962005051EDC00	20-02-2005	230-96	0,11	30 m	16 días
	LE72300962012007EDC00	07-01-2012	230-96	54,68	30 m	16 días
	LE72300962012055EDC00	24-02-2012	230-96	21,63	30 m	16 días
	LE72300962014044ASN00	13-02-2014	230-96	23,25	30 m	16 días
	LE72300962015095EDC00	05-04-2015	230-96	34,42	30 m	16 días
	LE72300962015335EDC00	01-12-2015	230-96	32,69	30 m	16 días
Landsat-8 OLI	LC82300962013353LGN00	19-12-2013	230-96	6,39	30 m	16 días
	LC82300962015023LGN00	23-01-2015	230-96	4,49	30 m	16 días
	LC82300962015103LGN00	13-04-2015	230-96	16,80	30 m	16 días
	LC82300962015263LGN00	20-09-2015	230-96	15,12	30 m	16 días
	LC82300962016010LGN00	10-01-2016	230-96	33,33	30 m	16 días
	LC82300962016122LGN00	01-05-2016	230-96	7,47	30 m	16 días
MODIS13A3		2002-2016	230-96		1 km	Mensual
SMOC-BEC		2011-2012			1 km	3 días
Global land cover Maps ESA/ CCI		2005	Global		300 m	5 años
		2010	Global		300 m	5 años
Cartografía de Zhao (2016)		2014	Global		30 m	
Precipitación		2011-2012	Estación Torres del Paine			Mensual y diaria