



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Escuela de Pregrado

Memoria de Título

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES POR MEDIO
DE IMÁGENES SATELITALES SENTINEL 2, DURANTE EL PERÍODO DE
INCENDIOS ESTIVALES 2016-2017, EN LA COMUNA DE PUMANQUE,
REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS, CHILE.**

Memoria para optar al título de Geógrafo

Michael Guillermo Peña Tapia

Profesor Guía: Dr. Pablo Sarricolea E.

SANTIAGO - CHILE

2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todas y a cada una de las personas que estuvieron presentes a lo largo del desarrollo de esta memoria, y que, con su compañía y apoyo, ayudaron de sobremanera a que todo este proceso universitario concluyera de buena forma.

En primer lugar, a mis padres Yanet y Wladimir; mi hermana Nadia, y mis pulguitas Christian y Axel, pilares fundamentales en mi vida, los cuales me han dado la motivación para seguir adelante en aquellos momentos donde a veces la motivación y las fuerzas fallan. Lo son todo para mí.

A mi madrina Estrella, tío Mario y mi prima Bárbara, que me han apoyado de una manera incondicional desde hace mucho tiempo, brindándome todos los tipos de ayudas posibles, en distintos aspectos de mi vida. Muchas gracias por todo, les debo mucho. Sin ustedes, nada de esto sería posible.

Agradecer a los amigos, aquellas personas que marcaron mi vida universitaria y personal... quiero que sepan compis que sin ustedes y sin su apoyo en las buenas, malas, fáciles y difíciles, mi vida personal no sería la misma. Lichita, eres una de las personas por las que siempre agradeceré a la vida por cruzarte en mi camino, eres sequísima en todo lo que haces y siempre te desearé suerte en todo lo que te propongas, porque a pesar que no eres tan buena en el pool, como persona eres bella y genial y te mereces lo mejor siempre. Lore, gracias por estar para mí y conmigo siempre que se ha necesitado y por todo el apoyo que me has dado en los más de 7 años que te conozco, mucha suerte en todo y gracias por ser mi panita. Erick, compañero de todos mis ramos a lo largo de la carrera, compartimos todo, conocimientos, experiencias, anécdotas, sueños, y no menos importante, pera, mucha pera... quiero que sepas que te agradezco mucho tu compañía y apañe. Son lo máximo, todos y cada uno de ustedes.

Agradecer a Pablo Sarricolea, por su ayuda incondicional en el desarrollo de esta memoria, con los conocimientos, buena onda y todo el tiempo brindado, gracias por ser un excelente profesor guía. Gino, jamás podría pagarte todo el apoyo que me has dado a lo largo de toda mi estadía universitaria, dentro y fuera de la U, gracias por todo el conocimiento brindado en todos los ramos que pudimos compartir.

Al escribir estos párrafos siempre llegan a la mente aquellas personas que fueron parte del proceso, las cuales faltaría página para nombrarlas... familiares, profesores, amigos, o simplemente personas que llegan a tu vida y te marcan con una energía agradable en su paso, y que agradeces por conocer por todo el apoyo emocional que brindaron... Tía Egle, Tía Ruth, Cecilia Pineda, Cono Mario, Tía Jaco, Tata Soro, Bárbara, Seba, Soa Ana, Don René, Claudia, Vale, Diego, amigos del Rayo Vayacaño, jugadores del gran y glorioso Pecho Tibio, y todas aquellas personas que me quedan por nombrar, gracias por todo.

Por último y no menos importante, agradecer a Epic Games, por el mejor juegazo de toda la historia, gracias por el Fortnite.

Atentamente: Michael Peña Tapia.

RESUMEN

La presente investigación propone el análisis del impacto de los incendios forestales ocurridos durante el período de verano de 2016-2017 en la comuna de Pumanque, perteneciente a la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Dichos impactos fueron calculados a partir de imágenes satelitales obtenidas por el sensor Sentinel-2, el cual posee una gran resolución espacial (10 metros por pixel); impactos que hacen referencia de forma principal a los índices de severidad del fuego según la metodología propuesta por Key (2006), el cual se basa en la diferencia de reflectancias de la superficie terrestre en el período comprendido desde antes de la ocurrencia, hasta el término del período de incendios. También se calcularon los usos y coberturas de suelo en cuanto a tipo y superficies, que fueron afectados según el catastro de usos de la CONAF (2013); asimismo, se evaluó de forma visual el comportamiento de la vegetación a partir del índice de NDVI del área de incendios, en los últimos 10 años, con datos históricos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine. Como resultados, se obtuvo que los usos y coberturas de suelos cuyos impactos tuvieron una mayor severidad de incendios forestales corresponden a las plantaciones forestales ubicadas en la comuna. En cuanto a los índices de NDVI de recuperación de la vegetación post incendios, esta categoría de uso de suelo es el que experimenta mayor pérdida de vegetación durante el período de incendios, pero, corresponde al uso de suelo que en período post-incendio, presenta una mayor rapidez en la recuperación de vegetación, en relación a los otros usos y coberturas que se presentan a nivel comunal. Esta investigación contribuye a la aplicación de metodologías de análisis de los impactos de los incendios forestales en el territorio.

Palabras claves: Incendios forestales, imágenes satelitales, índices de severidad, usos y coberturas de suelo, índice NDVI.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Índice de contenido	4
Índice de figuras	6
Índice de gráficos	6
Índice de tablas.....	7
Índice de anexos	7
CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	8
1.1. Introducción.....	8
1.2. Planteamiento del problema	9
1.3. Área de estudio	11
1.3.1. Ubicación	11
1.3.2. Población	12
1.3.3. Hidrografía	13
1.3.4. Clima y relieve.....	13
1.3.5. Vegetación y Usos de Suelo.....	15
1.4. Objetivos de la investigación	17
1.4.1. Objetivo General	17
1.4.2. Objetivos Específicos.....	17
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Cambio climático	18
2.1.1. Forzantes del cambio climático.....	18
2.1.2. ¿Cómo se manifiesta el cambio climático?	19
2.1.3. Influencia del cambio climático en los incendios forestales	20
2.1.4. Contexto nacional, caso de la ocurrencia de megasequía en período 2010 – 2015. 20	
2.1.5. Principales impactos de la Megasequía 2010-2015.....	21
2.2. Incendios forestales.....	22
2.2.1. Factores que contribuyen a la generación de incendios forestales	23
2.3. Índice de severidad de incendios forestales	24
2.3.1. Efectos de primer orden	24
2.3.2. Efectos de segundo orden	24
2.3.3. ¿Cómo influye la respuesta ambiental de las áreas quemadas?	25
2.4. Índice vegetacional en la teledetección	26
2.4.1. NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado).....	26

2.5. Impactos de las plantaciones forestales en el medio ambiente	28
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	31
3.1. Espacialización y severidad de incendios forestales	31
3.1.1. Espacialización	31
3.1.2. Índices de severidad	33
3.2. Impactos de los incendios en usos de suelo y vivienda	36
3.2.1. Impactos en los usos y coberturas de suelo	36
3.2.2. Impactos en la vivienda	38
3.3. Análisis del comportamiento de la vegetación quemada pre y post-incendio, período 2009 y 2019.	39
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	43
4.1. Espacialización y cálculo del índice de severidad de incendios forestales en la comuna de Pumanque.....	43
4.1.1. Espacialización y digitalización.....	43
4.1.2. Severidad	46
4.2. Evaluación del impacto de los incendios forestales en los distintos usos de suelo de la comuna de Pumanque.....	49
4.2.1. Impactos en los usos y coberturas de suelo comunal.	49
4.2.2. Impactos en las viviendas.....	51
4.2.3. Viviendas y usos no quemados	52
4.2.4. Viviendas y usos levemente quemados	54
4.2.5. Viviendas y usos leve a moderadamente quemados	56
4.2.6 Viviendas y usos y moderado a severamente quemados	58
4.2.7 Usos severamente quemados	60
4.3. Análisis del comportamiento de la vegetación quemada, pre y post-incendio, período 2009 – 2019.....	62
4.3.1. No quemado.....	63
4.3.2. Levemente quemado	64
4.3.3. Leve a moderadamente quemado.....	65
4.3.4. Moderado a severamente quemado.....	66
4.3.5. Severamente quemado.....	67
CAPÍTULO 5: LIMITANTES DEL MODELO, REFLEXIONES Y DISCUSIONES.	69
5.1. Limitantes del modelo.....	69
5.2. Reflexiones finales.....	71
5.3. Conclusiones	73
6. Bibliografía	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudio..... 11

Figura 2: Pendiente, comuna de Pumanque 15

Figura 3: Pisos vegetacionales y usos y coberturas de suelo..... 16

Figura 4: Déficit o superávit pluviométrico promedio para los períodos 1966-1969 y 2010-201521

Figura 5: Reflectancia de vegetación.....27

Figura 6: Fórmula de cálculo de índice vegetal.27

Figura 7: Balance nacional de Gases de Efecto Invernadero.....29

Figura 8: Ejemplo de una imagen falso color con combinación RGB 843.....32

Figura 9: Diferencias reflectancia entre vegetación sana y alterada.34

Figura 10: Esquema de delimitación de usos y cobertura de suelo quemados37

Figura 11: Esquema de delimitación de viviendas afectadas38

Figura 12: Esquema de cálculo de NDVI.....40

Figura 13: Composición color real post incendio, comuna de Pumanque43

Figura 14: Composición falso color post incendio, comuna de Pumanque44

Figura 15: Digitalización de áreas quemadas, comuna de Pumanque.....45

Figura 16: Índices de severidad de incendio47

Figura 17: Usos y coberturas de suelo en el área quemada en la comuna de Pumanque, región del Lib. Bernardo O’Higgins.50

Figura 18: Ubicación del total de viviendas rurales a nivel comunal al año 2016.52

Figura 19: Viviendas y usos y coberturas de suelo no quemados en el área de incendio. 53

Figura 20: Usos y coberturas de suelo “levemente quemados” en el área de incendio.55

Figura 21: Usos y coberturas de suelo “leve a moderadamente quemado” en el área de incendio.....57

Figura 22: Usos y coberturas de suelo “moderado a severamente quemados” en el área de incendio.59

Figura 23: Usos y coberturas de suelo “severamente quemados” en el área de incendio.61

Figura 24: Error en delimitación de cuerpos de agua.....69

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Número de incendios por región, período 2017-20189

Gráfico 2: Ejemplo de base de datos resultante por cada polígono ingresado a Google Earth Engine.41

Gráfico 3: Ejemplo de base de datos resultante del promedio del total de polígonos ingresados a Google Earth Engine.41

Gráfico 4: Comportamiento de la vegetación en las diferentes categorías de severidad durante período 2009-2019.....63

Gráfico 5: Comportamiento de NDVI en áreas no quemadas.....64

Gráfico 6: Comportamiento de NDVI en áreas levemente quemadas65

Gráfico 7: Comportamiento de NDVI en áreas leve a moderadamente quemadas66

Gráfico 8: Comportamiento de NDVI en áreas moderada a severamente quemadas67

Gráfico 9: Comportamiento de NDVI en áreas severamente quemadas.....68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variación de población por sexo.....	12
Tabla 2: Variación de población por sexo.....	12
Tabla 3: Temperaturas medias, mínimas y máximas promedio.....	14
Tabla 4: Impactos de la Megasequía 2010-2015.	21
Tabla 5: Desafíos plan de reforestación en Chile.....	30
Tabla 6: Especificaciones técnicas de Sensor SENTINEL-2	31
Tabla 7: Categorización de severidad	35
Tabla 8: Tabla resumen objetivo 1	36
Tabla 9: Tipos de usos y coberturas en la comuna de Pumanque	38
Tabla 10: Tabla resumen objetivo 2.....	39
Tabla 11: Tabla resumen objetivo 3.....	42
Tabla 12: Superficie quemada por polígono digitalizado	46
Tabla 13: Superficie por índice de severidad	48
Tabla 14: Usos y coberturas de suelo de acuerdo a su cantidad de superficie y sus índices de severidad en el área de incendio.	51
Tabla 15: Usos y coberturas por categoría “no quemado” en la comuna de Pumanque. ..	54
Tabla 16: Usos y coberturas por categoría “levemente quemado” en la comuna de Pumanque.	56
Tabla 17: Usos y coberturas por categoría “leve a moderadamente quemado” en la comuna de Pumanque.	58
Tabla 18: Usos y coberturas por categoría “moderada a severamente quemados” en la comuna de Pumanque.	60
Tabla 19: Usos y coberturas por categoría “severamente quemados” en la comuna de Pumanque.	62

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Cambios en el uso de suelo en Chile, período 1986 – 2011.	85
Anexo 2: Impactos de la megasequía en casos nacionales.	86
Anexo 3: Comparación de pluma de sedimentos en ríos de Chile central 2008-2013.....	87
Anexo 4: Demostración de la megasequía mediante MODIS.....	88
Anexo 5: Proporción de incendios forestales período 1990-2014.	89
Anexo 6: Método de digitalización de incendios.....	90

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Los incendios se conforman como un factor de cambio y transformación ambiental en ecosistemas de carácter mundial (FAO, 2006); asimismo, poseen dimensiones de impactos que van desde lo global haciendo referencia a la incidencia de mundial de gases de efecto invernadero (Chuvienco, 2009); como también en dimensiones regionales como la degradación de suelos, pérdida de índice de biodiversidad, como también el desencadenamiento de daños hacia las personas e infraestructuras de diferentes tipos (Omi, 2005).

Los incendios se han manifestado de forma de recurrente en diferentes territorios, y sumado a esto, es que se manifiesta la importancia de los cambios en los usos de suelo y del territorio, que han influenciado de forma directa en la acentuación de efectos negativos del fuego, tanto en lo relacionado a la cantidad de pérdidas humanas, como también hacia el daño medioambiental que estos fenómenos acarrearán con su manifestación. Debido a que hasta la actualidad tienden a ser más severos y recurrentes en condiciones naturales, respecto a períodos pasados. Esta tendencia de aumento tanto en número como de severidad de los incendios forestales tienden a agravarse debido al impacto del calentamiento global, lo que constituiría en variadas zonas del planeta, tanto un aumento de la aridez, como también en consecuencia de esto, la intensidad y duración de las temporadas de incendios (Chuvienco, 2009). Por otro lado, al hacer uso de datos proporcionados por diferentes sensores remotos en función de evaluación y prevención de incendios forestales, es un trabajo que se ha ido desarrollando cada vez en mayor medida durante la última década (Bianchini et al., 2005). En los cuales el rango tanto de técnicas como tipos de sensores ha ido en un aumento constante, resultando tanto en técnicas como cantidad de herramientas bastante amplias.

La evaluación de los diferentes efectos del fuego sobre la naturaleza y sociedad considera la serie de cambios que se hayan producido en un territorio determinado como consecuencia de la acción de incendios forestales. Dichos efectos tienen relación directa tanto con la intensidad como con el índice de severidad del fuego en la superficie terrestre (Chuvienco, 2009).

La comuna de Pumanque, ubicada en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, estuvo fuertemente afectada por la ocurrencia de un gran número de incendios forestales durante el período de verano de 2017, para lo cual se hace necesario el cálculo del nivel de impacto de estos sucesos en el territorio. Si bien se han hecho estudios de incendios forestales en la zona centro sur durante el 2017, no se han utilizado para estos estudios, imágenes provenientes del sensor Sentinel-2, el cual es un satélite con una gran resolución espacial y temporal. El siguiente documento, tiene por finalidad evaluar el nivel de impacto de los incendios forestales en la comuna de Pumanque, como también evaluar las dimensiones del impacto en los diferentes usos y coberturas de suelos, como también la evolución de la vegetación en la comuna durante los últimos 10 años, todo esto anterior mediante el uso de la Teledetección, la cual puede constituirse como una herramienta que

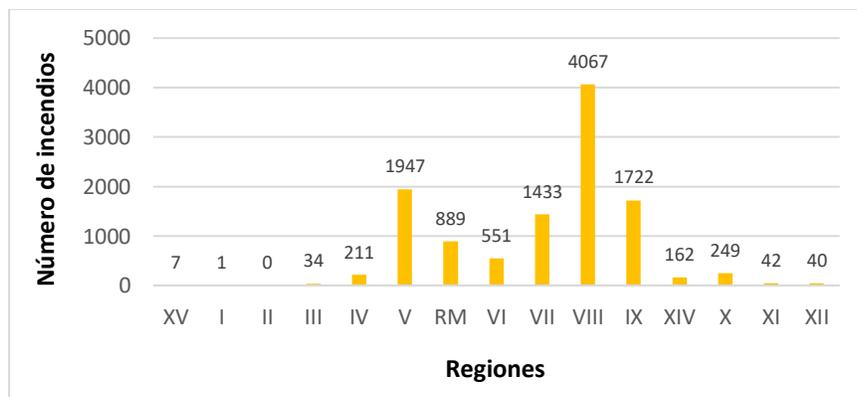
facilite de gran forma el conocimiento geográfico actual en la evaluación de fenómenos como lo son los incendios forestales.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático es el fenómeno que más ha caracterizado al planeta tierra en la época actual, el cual ha abierto la posibilidad de ocurrencia de varios eventos inusuales en los territorios. Eventos como una sostenida disminución de las precipitaciones en los períodos invernales, veranos más prolongados y con menos humedad, el aumento en la magnitud de eventos meteorológicos en períodos cortos, entre otros fenómenos (González et al., 2011). El aumento de las temperaturas, la disminución de las precipitaciones, los cambios en los usos de suelo y sus cubiertas (Modugno et al., 2016), además de la intervención antrópica, han provocado condiciones propicias para la ocurrencia de incendios forestales de gran magnitud. Por otra parte, en regiones europeas, el tipo de usos de suelo y el cambio de las coberturas es tendencia, en donde se está constantemente reconfigurando las estructuras de los paisajes alrededor de las áreas urbanas (Modugno et al., 2016). En estas áreas, la proximidad entre comunidades y elementos del paisaje altamente combustibles, han aumentado el nivel de riesgo de incendio forestal.

En el caso de Chile, este ha sido el lugar de la ocurrencia de grandes y numerosos incendios forestales, los que entre las principales consecuencias provocadas se traducen en que entre 2008 y 2016, han sido afectadas alrededor de 500.000 hectáreas a lo largo del país, y en el año 2017, una cantidad similar de hectáreas afectadas que dio lugar en el mega evento de incendios forestales ocurrido, los cuales cobraron la vida de 11 personas y la pérdida de más de 1000 viviendas (Arellano, A., 2017), estos eventos, se produjeron principalmente en período estival, sobre todo en las zonas centro-sur del país (ver Gráfico 1), en donde la propagación de las llamas se asocia a una serie de factores, tanto climáticos como geográficos (topográficos) y antrópicos; y los impactos generados se asocian a esferas tanto naturales, como sociales y económicas.

Gráfico 1: Número de incendios por región, período 2017-2018.



Fuente: Elaboración propia en base a catastro de incendios de la CONAF (2018).

A nivel regional, la sexta región del Libertador Bernardo O'Higgins, ha sido foco de una cantidad importante de incendios forestales en el último tiempo, cantidad que asciende a un total de 551 sucesos entre 2016 y mediado de 2017, según el catastro de la Corporación Nacional Forestal actualizado y publicado en el año 2018; que la ubican entre las primeras 6 regiones más afectadas del territorio nacional por los incendios del verano de 2017; afectando tanto al medio natural, como también a parte de la población residente en ella. Sin embargo, según los mismos datos estadísticos, la VI región, es el territorio a nivel nacional, que posee la mayor cantidad de hectáreas afectadas por incendio, entre el año 2016 y mediado de 2017, con un promedio que alcanza las 414 hectáreas por incendio (CONAF, 2018).

Dentro de la VI región, se encuentra la comuna de Pumanque, la cual fue una de las comunas más afectadas según el catastro hecho por la CONAF mediante procesamiento de imagen satelitales a través de sensor LANDSAT-8; la cual según el director regional de la Corporación Nacional Forestal, en dicha comuna tuvo lugar un incendio de cualidades extremas (El Desconcierto, 2017), convirtiéndose en el más catastrófico en los últimos 50 años, que necesitó más de 3000 bomberos, brigadistas de la CONAF, y 3 helicópteros particulares en su combate (Mostrador, 2017), provocando la evacuación de alrededor de 200 personas, entre ellas agricultores y pequeños ganaderos (Tele 13, 2017), actividades a las que se desempeña gran parte de la población comunal.

Es por lo anteriormente mencionado, haciendo referencia a la magnitud de la totalidad de los incendios forestales ocurridos en la comuna de Pumanque que se hace necesario una evaluación tanto espacial, temporal de los impactos generados por este megaincendio, incluyendo los niveles de severidad de los incendios en el territorio donde estos se llevaron a cabo; como también, reconocer de manera dinámica, las dimensiones de los impactos en los distintos usos y coberturas de suelo, además de, cómo aquella superficie y vegetación quemada se ha ido recuperando a través del tiempo hasta el día de hoy.

1.3.2. Población

Según el INE, entre los reportes estadísticos comunales del año 2002 y 2017, la comuna de Pumanque cuenta con una población actual de 3.421 habitantes, el cual presenta una variación de -0,61 % respecto al año 2002 (3.442); además, el 100% de la población comunal se encuentra localizada en el área rural (INE, 2017).

Respecto a los índices de población por sexo (ver Tabla 1), se tiene que existe tanto en los informes estadísticos de año 2002 y 2017, una mayor presencia de población masculina respecto a la femenina, pero hasta el año 2017, la población masculina tuvo una disminución en la cantidad de habitantes, mientras que la femenina presentó un leve aumento.

Tabla 1: Variación de población por sexo.

Unidad territorial	Año 2002		Año 2017	
	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
Comuna de Pumanque	1.793	1.640	1.751	1.670
Región del Lib. Bernardo O'Higgins	392.335	388.292	453.710	460.845
País	7.447.695	7.668.740	8.972.014	8.972.014

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos por el INE (2017).

En cuanto a la población por grupos de edad (ver Tabla 2), la comuna de Pumanque presenta entre en el año 2017, una clara predominancia numérica de habitantes tanto masculinos como femeninos pertenecientes a los grupos de edad por sobre los 45 años, mientras que aquellos habitantes pertenecientes a niños y niñas hasta 14 años, representan la minoría del total de habitantes. Esto anterior, se contradice con los datos estadísticos del año 2002, debido a que niños y niñas hasta 14 años presentaban la mayor cantidad de habitantes a nivel comunal, y en referencia a aquellos por sobre los 45 años, obtenían una minoría en la cantidad de personas, sobre todo a aquellas sobre 60 años, grupo etario que no alcanzaba las 300 personas tanto femeninas como masculinas. Este panorama habla sobre una disminución en la tasa de natalidad en los últimos 15 años, y una clara tendencia de la población hacia el envejecimiento.

Tabla 2: Variación de población por sexo.

Grupo de edad	2002		2017	
	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
0 a 14	460	429	263	224
15 a 29	367	251	325	325
30 a 44	432	367	337	303
45 a 59	320	292	410	355
60 o más	291	283	416	463
Total	1870	1622	1751	1670

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos por el INE (2017).

1.3.3. Hidrografía

La hidrografía de la comuna está compuesta principalmente por la presencia de la cuenca y estero del Nilahue, la cual nace en los cordones montañosos al oriente de la comuna de Lolol, y que, a su vez, desemboca en la localidad de Cáhuil, en la comuna de Pichilemu. Esta cuenca es la única a nivel regional que traspasa la cordillera de la costa en la VI región. La importancia de este estero radica principalmente en que es un caudal utilizado para el abastecimiento de agua potable en las localidades de Nilahue Cornejo y Nilahue Barahona, además de su uso para el regadío (Ilustre Municipalidad de Pumanque, 2019)

Hacia el norte de la comuna, no se aprecia caudales de importancia, debido a que no se aprecian escurrimientos de tipo permanentes, esto debido a la existencia de quebradas que se activan temporalmente durante la época de lluvias. Sumado a esto anterior, se destaca la presencia de tranques de acumulación de aguas para regadío, los cuales son de carácter privado, que, en época estival, son de carácter mixto, haciendo referencia a que se encuentran algunos con agua y otros totalmente secos (Ilustre Municipalidad de Pumanque, 2019).

1.3.4. Clima y relieve

Clima

El clima de tipo Templado cálido con estación seca prolongada, el cual corresponde a un tipo de clima que caracteriza a gran parte de la depresión intermedia o la zona del valle longitudinal; se presentan cálidos y secos veranos y lluviosos inviernos. Cuenta con una precipitación con gradiente de aumento de norte a sur, en los cuales los índices de agua caída oscilan entre los 450 mm hacia el norte, hasta los 900 mm hacia el sur, índices que se presentan principalmente en invierno. En cuanto a la cordillera de la costa, se tiene que esta limita la influencia costera, lo que permite que exista menor nubosidad hacia el interior respecto a la costa de esta (Ilustre Municipalidad de Pumanque, 2019).

En la comuna de Pumanque, el tipo de clima existente presenta temperaturas medias anuales oscilantes a 18°C y precipitaciones medias que se ubican entre 600 mm y los 2000 mm anuales; presentando una estación seca prolongada de 6 a 8 meses, los cuales involucran la primavera, verano y otoño, presentándose también una influencia oceánica (mediterráneo). Además, se encuentra bajo la influencia del Anticiclón del Pacífico Sur, que provoca que durante los meses de invierno se presenten la mayor cantidad de precipitaciones irregulares (Ilustre Municipalidad de Pumanque, 2019).

Los índices de precipitación más importantes se presentan en (ver Tabla 3), los meses de mayo, junio, julio y agosto, que en promedio varían entre los 100 y 189 mm; mientras que en menor medida se encuentran los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, que en promedio presentan índices de precipitación que oscilan entre los 6 y 12 mm. En cuanto a temperatura, se tiene que, en cuanto a máximas, se superan los 24°C entre noviembre y marzo; y las mínimas promedio, se ubican entre los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, oscilando entre 5,3°C y 7,2°C (Datos Climáticos Mundiales, s. f.).

Tabla 3: Temperaturas medias, mínimas y máximas promedio.

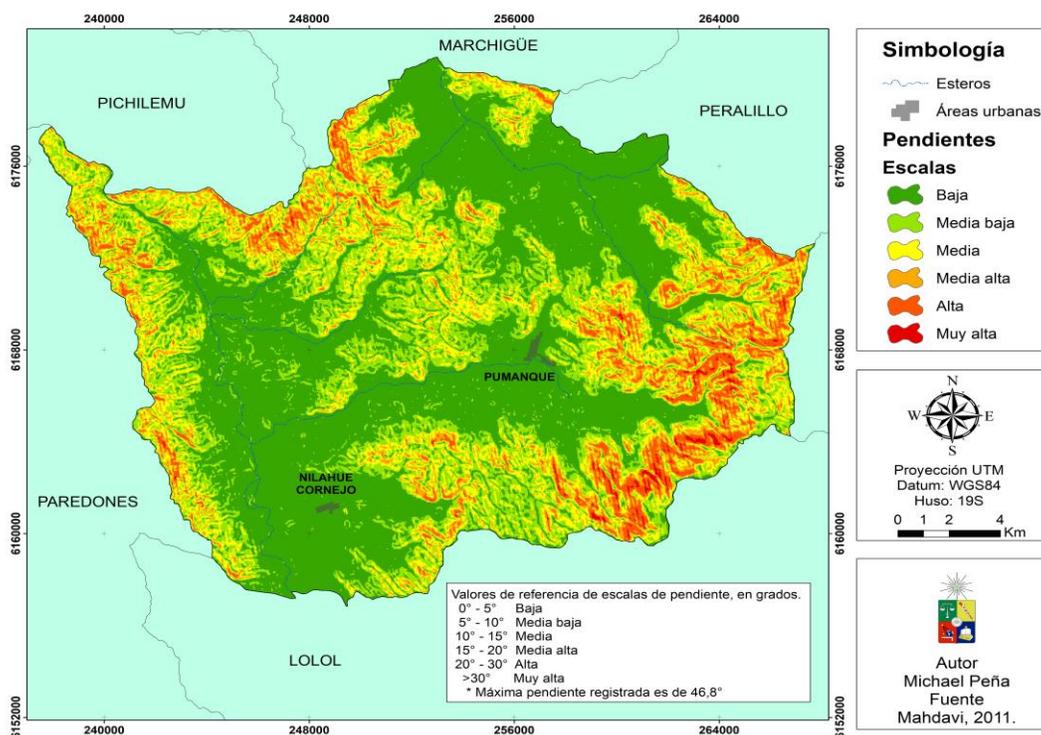
T° (C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tem. Media	22,1	21,2	18,7	15	12	10	9,6	10,5	12,6	15,2	17,8	20,7
Tem. Mínima	14,3	13,4	11,3	8,5	7,2	6,1	5,3	5,7	7,1	9,1	11,1	13,1
Tem. máxima	29,9	29	26,1	21,6	16,9	13,9	13,9	15,4	18,1	21,3	24,6	28,3
PP (mm)	6	7	10	31	105	189	147	106	51	29	12	7

Fuente: Elaboración propia en base a Datos Climáticos Mundiales.

Relieve

La comuna de Pumanque presenta una variedad de escenarios moldeados por los diferentes niveles y tipos de pendientes existentes (ver Figura 2). En primer lugar, la mayor parte del territorio comunal, lo conforman valles de baja pendiente, inferior a 5° de inclinación, los cuales se instalan conforme a la presencia de los diferentes esteros presentes en la comuna, panorama que ofrece condiciones propicias para el desarrollo de la actividades agropecuarias, la cual es la principal actividad a nivel comunal debido a su carácter rural. Estos niveles de pendientes también moldean la localización de los diferentes asentamientos comunales, debido a que la gran mayoría de estos, se encuentran establecidos en aquellos territorios cuyos niveles de pendientes presentan niveles inferiores a 10° de inclinación. En cuanto a aquellos espacios con niveles de pendiente de mayor inclinación, lo conforman las laderas de cordones de cerros y colinas presentes hacia el este y hacia el oeste, por cordones de la cordillera de la costa, cuyas pendientes alcanzaban los 46° de inclinación, llegando a una categoría de pendiente de tipo muy alta; cordones de cerros que en sus extremos alcanzaban alturas cercanas a los 650 metros sobre el nivel del mar.

Figura 2: Pendiente, comuna de Pumanque.



Fuente: Elaboración propia en base a Mahdavi (2011).

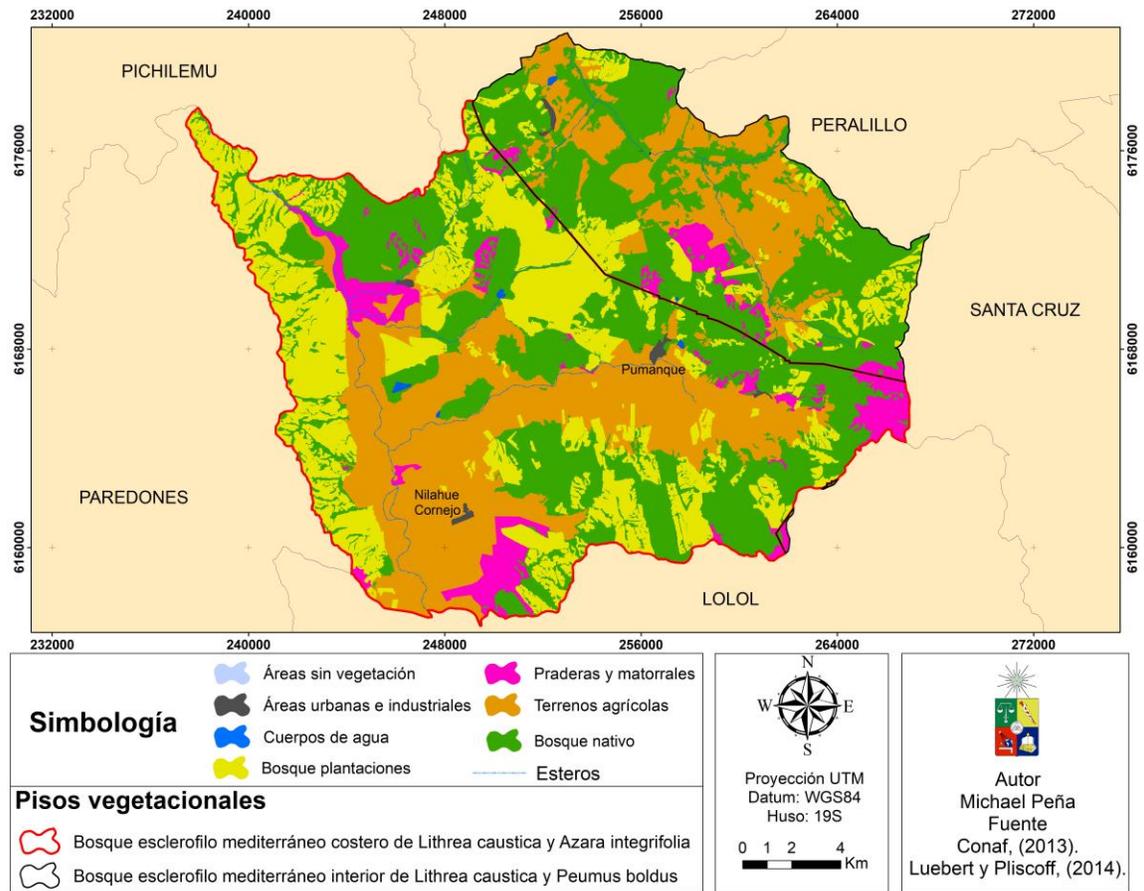
1.3.5. Vegetación y Usos de Suelo

Según los pisos vegetacionales de Luebert y Pliscoff del año 2014 (ver Figura 3), en la comuna de Pumanque, se presentan especies principalmente asociadas al bosque esclerófilo, especies propias de un ambiente y clima mediterráneo que se encuentra en la región (Luebert & Pliscoff, 2014), esta flora, se encuentra altamente intervenida debido a las actividades agropecuarias en valles, y extensos territorios utilizados para plantaciones forestales en cordones montañosos. Por otra parte, según el catastro de uso y cobertura de suelo de la CONAF del año 2013, en la comuna se presentan 7 usos y coberturas de suelo principales, en los cuales, los relacionados a plantaciones forestales (Eucalipto y Pino radiata) y bosques nativos, predominan en dimensiones por sobre otros usos como los que se le dan a terrenos agrícolas en cultivos de Vides, tomates, olivos, etc. (Ilustre Municipalidad de Pumanque, 2019); praderas y matorrales, áreas urbanas, cuerpos de agua y áreas sin vegetación.

En las áreas en donde existe vegetación nativa, las especies más comunes relacionadas al bosque esclerófilo corresponden principalmente al Boldo (*Peumus boldus*), Quillay (*Quillaja saponaria*), Peumo (*Cryptocaria alba*) y Maitén (*Maytenus boaria*). En aquellas laderas de los cordones montañosos que se presentan asoleadas, las especies que predominan son el Espino (*Acacia caven*), el Tebo (*Trevoa trinervis*) y el Quisco (*Echinopsis chilensis*); en aquellas quebradas que se presentan sombrías y con humedad, abundan Peumos, Pataguas (*Crinodendron patagua*) y el Maqui (*Aristotelia chilensis*); hacia lechos de esteros,

cuya humedad aumenta, aparece vegetación de tipo hidrófila propia de humedales, especies como Sauces (*Salix chilensis*) y plantas de tipo acuático, como juncáceas.

Figura 3: Pisos vegetacionales y usos y coberturas de suelo.



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2013); y Luebert y Plisscoff (2014).

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el impacto de los incendios forestales por medio de imágenes satelitales provenientes de sensor SENTINEL 2, en la comuna de Pumanque, durante período de incendios estivales temporada 2016 – 2017.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Espacialización y cálculo del índice de severidad de incendios forestales en la comuna de Pumanque, ocurridos en verano del año 2017, por medio de sensor SENTINEL 2.
2. Evaluación del impacto de los incendios forestales en los distintos usos de suelo y vivienda en la comuna de Pumanque.
3. Análisis del comportamiento de la vegetación quemada pre y post-incendio, período 2009 - 2019.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. CAMBIO CLIMÁTICO

Durante la convención “Marco sobre Cambio Climático”, llevada a cabo durante el año 1992, definió este concepto como: El cambio en el clima, el cual es atribuible tanto directa como indirectamente a la actividad humana, la cual altera la composición de la atmósfera global; y que también se suma a la variabilidad natural del clima observado sobre períodos de tiempo comparables. Durante el año 1999, se define el concepto de calentamiento global, el cual consiste en “el incremento gradual en las temperaturas promedio del aire cerca de la superficie, y de los océanos desde mediados del siglo XX y su continua proyección (Sánchez, 2016).

Para el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), este concepto denota una variación en el estado del clima identificable, calculado a partir de un valor medio y la variabilidad de sus propiedades, el cual persiste en un período de tiempo prolongado, el cual por lo general se cifra en decenios o períodos más largos (Díaz, 2012); En contraparte con lo que plantea (Miller, 2008), el cual sostiene que cambio climático global hace referencia a modificaciones del clima del planeta en cualquier aspecto, tal como temperatura, precipitación y las rutas de las tormentas.

El programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en el informe publicado de Desarrollo Humano (2007 – 2008), plantea que este fenómeno de cambio climático se presenta como el problema que determina el desarrollo humano en nuestra generación (Díaz, 2012). Hoy en día, modelos climáticos predicen un calentamiento global con valores entre 1,4°C hasta 5,8°C entre los años 1900 y 2100. Dichas proyecciones tienen su base en un conjunto de hipótesis sobre las principales fuerzas que dirigen las emisiones futuras, dichas fuerzas se traducen principalmente en el crecimiento poblacional y el cambio tecnológico; sin embargo, no se toma en cuenta la necesidad de aplicación de políticas sobre cambio climático en función de disminuir los niveles de emisiones (Díaz, 2012).

2.1.1. Forzantes del cambio climático

Los principales factores que afectan los cambios de temperatura media de la tierra y con esto, el cambio climático, corresponden principalmente a los cambios del nivel del mar, los efectos provocados por las nubes, la emisión de aerosoles, dióxido de carbono, gas metano e hidratos de metano a la atmósfera. Por otra parte, también se toma en cuenta aquellos efectos relacionados a los cambios de reflexión terrestre y aquellos cambios en el campo magnético interior. Otros factores que también inciden en el calentamiento global corresponden a los niveles de contaminación del aire, cambios en el hielo polar, contenido de vapor de agua y los niveles de coberturas de nubes, además de los niveles de energía solar que alcanza la tierra (Miller, 2008).

En relación a esto anterior, durante el año 2008 en Polonia, en la Cumbre de Poznan, se consideró que el fenómeno de cambio climático se debe principalmente a la emisión de gases de efecto invernadero debido al uso extensivo de combustibles fósiles (Díaz, 2012). Informes llevados a cabo por el IPCC enfocan las causas del cambio climático hacia un

origen de tipo natural y antropogénicas, referido a que a lo largo del tiempo, ha existido una cadena de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las concentraciones atmosféricas, y la existencia de un forzamiento radiactivo. En relación a lo expuesto anteriormente, entre los años 1970 y 2004, el aumento más importante de GEI a la atmosfera, tienen su origen en las actividades humanas relacionadas al suministro de energía, transporte e industria, mientras que vivienda y comercio, agricultura y silvicultura (la cual incluye el fenómeno de deforestación), han tenido un aumento también. (Díaz, 2012).

Cuando se habla de un forzante, hace referencia a la implicancia de un agente externo al sistema climático que provocan los diferentes niveles de variaciones. Se habla que existen dos tipos de forzantes del cambio climático, los llamados naturales y los antropogénicos (Takahashi, s. f.). Cuando se hace referencia a los forzantes de tipo natural, se entienden como aquellos que no tienen que ver con la acción humana, sino que, con la evolución y funcionamiento natural de la tierra, por ejemplo, aquellos cambios en el clima que fueron resultado de los cambios sutiles en la rotación de la tierra, eras glaciales, erupciones volcánicas, u otro fenómeno de origen natural. Por otra parte, cuando se hace referencia a los forzantes antropogénicos, se hace referencia a la acción del hombre en la incidencia del clima, como la emisión de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, metano, óxidos, entre otros, gracias al uso de combustibles fósiles (Takahashi, s. f.). Estos gases de efecto invernadero, influyen en el balance de la energía del planeta, que contribuye al aumento de las temperaturas globales. Por otra parte, se sostiene también, que otro factor que influye en los forzantes antropogénicos, es el que tiene que ver con los cambios sostenidos de las coberturas de los suelos, sobre todos aquellos que hacen referencia al paso de bosques y pastizales, por terrenos agrícolas, debido a que estos últimos, reflejan más radiación solar (Takahashi, s. f.).

2.1.2. ¿Cómo se manifiesta el cambio climático?

Las principales manifestaciones del cambio climático según el IPCC (2002), tienen que ver con el primer lugar, el aumento promedio de las temperaturas, la disminución de la extensión de los campos de nieve y hielo, cuyos datos satelitales obtenidos desde el año 1978 indican que en un promedio anual, la extensión de los campos de hielo marino ártico han disminuido entre un 2,1% y 3.3% por decenio, y en mayor medida en los veranos, cuyos datos de disminución se ubican entre 5.0% y 9.8% desde el año 1900. En este sentido se calculó que la extensión máxima de suelo estacional congelado ha experimentado una disminución cercana a un 7% en el Hemisferio Norte, con máximas de hasta un 15% durante la primavera (Díaz, 2012); existen también otras manifestaciones del cambio climático, orientadas principalmente al aumento de la actividad ciclónica tropical intensa del Atlántico Norte desde la 1970, mayor influencia de los valores extremos del nivel del mar, ocurrencia de eventos de precipitación intensa, como también episodios cálidos como olas de calor (Díaz, 2012).

Según el informe del IPCC cambio climático y biodiversidad del año 2002, se presenta que aquellos cambios esperados en el clima involucran aspectos como el constante aumento de las temperaturas, variaciones en las precipitaciones, aumento en el nivel del mar, y la constante frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos, los cuales producen

variabilidad climática; también, existen otros aspectos en los cuales se refleja el cambio climático, hace referencia a la composición atmosférica, la cual se encuentra en constante cambio, resultado del aumento de las concentraciones de gases que producen efecto invernadero como el Dióxido de Carbono (CO₂), y el Metano (CH₄) (Díaz, 2012).

2.1.3. Influencia del cambio climático en los incendios forestales

Los incendios forestales tienen un impacto anualmente de entre 330-430 millones de hectáreas de vegetación global (Giglio et al., 2010), en este sentido, se calcula que el 86% de los incendios forestales ocurren en praderas tropicales y sabanas, y el 11% en bosques (Mouillot & Field, 2005). Existe evidencia de carbón que los incendios han aumentado desde el último máximo glacial ocurrido hace alrededor de 12.000 años (Power et al., 2008). En relación al último milenio, la dinámica global de los incendios alrededor del mundo, ha sido impulsada por la precipitación, y cambió a un régimen principalmente antropogénico, ocurrido durante y desde la revolución industrial (Pechony & Shindell, 2010). Existe evidencia que la superficie afectada y la creciente severidad de los incendios forestales en muchas partes del mundo han ido en aumento (de Groot & Flannigan, s. f.).

Pronósticos para el futuro plantean que los regímenes de incendios sean impulsados principalmente por el aumento de las temperaturas (Pechony & Shindell, 2010), con la existencia de condiciones más cálidas, lo que conduce al aumento tanto de condiciones propicias, temporadas de ocurrencia, cantidad de incendios y de áreas afectadas (de Groot & Flannigan, s. f.).

Hoy en día, existen variadas razones para explicar los aumentos regionales en la actividad de los incendios forestales, pero de forma principal, se traducen en la dinámica de entre combustibles, clima/ tiempo atmosférico, aquellos agentes de ignición y la actividad antrópica. En este sentido, cambio climático tendrá una influencia directa en los regímenes de incendios en el futuro, en muchas regiones del orbe, debido a que algunas investigaciones actuales, plantean un aumento tanto en las superficies afectadas como del aumento en la ocurrencia de incendios (de Groot & Flannigan, s. f.).

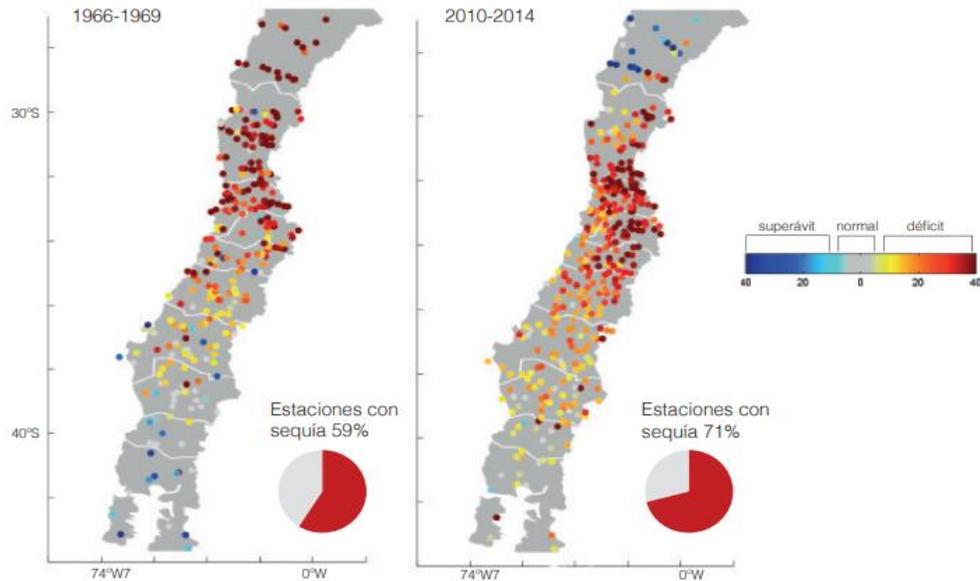
2.1.4. Contexto nacional, caso de la ocurrencia de megasequía en período 2010 – 2015.

Desde el año 2010, entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía, se ha experimentado un déficit en el índice de precipitaciones de alrededor de un 30%. Dicha pérdida de aguas lluvias ha permanecido de forma ininterrumpida, y forma parte de la década más árida de los últimos 100 años, lo que ha provocado el aumento del déficit hídrico a través de la evaporación desde lagos, embalses y cultivos. (CR2, 2015, p. 2).

Ante los múltiples impactos provocados por la megasequía, la sociedad chilena ha respondido de variadas maneras, pero, en general se han llevado a cabo tareas bajo el supuesto que este fenómeno es extraordinario pero transitorio, no obstante, alrededor de un 25% del déficit de las precipitaciones durante el período de megasequía se atribuye al cambio climático antrópico; se sostiene que los impactos de esta megasequía, contribuirá a una progresiva aridificación de la zona centro y sur de Chile, incrementando la ocurrencia de sequías extensas y prolongadas. (CR2, 2015, p. 2). Según registros, en Chile existen períodos de años secos principales, los cuales corresponden principalmente en primer lugar

al ocurrido entre 1945 a 1947, el segundo entre 1967 y 1969, un tercero entre 1988 y 1990 y finalmente el ocurrido entre 2010 y 2015, el cual corresponde al período de sequía de mayor duración y extensión territorial.

Figura 4: Déficit o superávit pluviométrico promedio para los períodos 1966-1969 y 2010-2015.



Fuente: Informe a la nación CR2 (2015).

2.1.5. Principales impactos de la Megasequía 2010-2015

La incidencia de la megasequía se hace presente en diferentes aristas, las cuales se desenvuelven y desencadenan diferentes fenómenos en el territorio nacional. Tal como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 4: Impactos de la Megasequía 2010-2015.

Impacto	Descripción
En recursos hídricos	Cantidad de agua que fluye en los ríos de Chile central ha experimentado una disminución en respuesta al déficit de precipitaciones durante el período de megasequía, cuyo efecto también se observa en lagos, embalses, aguas subterráneas y la elevación de la altura de los niveles de nieve durante primavera y verano (ver anexo 1).
Recursos costeros	Debido a la baja en los caudales de los ríos durante la megasequía, algunos nutrientes como el nitrato y fosfato se drenan en menor medida al mar (disminución entre un 25% a un 75%), lo que provoca una disminución en la productividad biológica de la zona costera (ver anexo 2).

Impactos en vegetación	Si bien la vegetación nativa y ciertas especies exóticas pueden adaptarse para poder resistir sequías intensas, sólo puede ser posible en episodios de corta duración. La actual megasequía, debido a sus características produjo un notable deterioro de la vegetación no irrigada en gran parte de Chile central (ver anexo 3).
Impactos en incendios forestales	Ocurrencia de una prolongación de la temporada de incendios a todo el año, la cual ha provocado que la superficie forestal quemada en la zona centro-sur aumente en un 70% durante la megasequía, un hecho que no se había visto en 50 años (ver anexo 4).

Fuente: Elaboración propia en base a Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (2015).

2.2. INCENDIOS FORESTALES

La concepción de incendios forestales manejada para el territorio nacional, propuesta por la CONAF, corresponde a un fuego, que cualquiera sea su origen, con daños al medio ambiente, las personas o genere algún peligro, se propague sin control en terrenos rurales, esto por medio de la vegetación, la cual corresponde principalmente a arbustiva, leñosa o herbácea, viva o muerta. En otras palabras, corresponde a un fuego de tipo descontrolado en el cual se propaga gracias a las características combustibles de las especies vegetales, en la cual su propagación, puede destruir todo lo que se presente a su paso (CONAF, s. f.).

Los incendios forestales “conforman uno de los principales agentes de perturbación de ecosistemas del planeta”, en las cuales son millones las hectáreas afectadas cada año, en donde la elevada presión de las actividades humanas sumado a la influencia del calentamiento global, aumentan la frecuencia, intensidad y el tamaño de estos fenómenos, cuyas consecuencias para comunidades naturales y sociales son de primer orden (Díaz-Hormazábal & González, 2016)

Además, los cambios producidos por los incendios forestales en las últimas décadas han repercutido principalmente en la dimensión ecológica y social, degradando servicios ecosistémicos, pérdidas económicas y vidas humanas (Pausas & Verdú, 2008; Syphard, Keeley, Massada, Brennan, & Radeloff, 2012). Para el caso chileno, los incendios forestales, son concebidos como unos de los principales problemas medioambientales que afectan al territorio (Castillo et al., 2003), atrayendo la atención de los medios y la sociedad misma, y una causa de esto, principalmente radica en la magnitud de los incendios forestales ocurridos en el último tiempo (González, 2005); (Valenzuela & Bueno, 2012).

Siguiendo con el caso nacional, los incendios forestales se concentran principalmente entre los 33° y 38° de latitud sur, territorio el cual comprende al centro de producción silvoagropecuaria del país. La vegetación natural en Chile, ha sido la más afectada con más del 80% de la superficie quemada, en los cuales un tercio corresponde a bosque nativo y el territorio restante correspondiente a pastizales y matorrales. Para el caso de plantaciones forestales, estas han sido las que en menor medida han sido afectadas, debido a su menor superficie o cobertura relativa y los niveles de inversión que se han impuesto para proteger

este recurso. Aunque en los últimos años, las plantaciones forestales afectadas han aumentado en gran medida (Peña-Fernández, s. f.).

Los programas de manejo y gestión de incendios forestales, tomando en cuenta el aumento en los costos de protección y pérdidas causadas por estos fenómenos, han tomado gran importancia a nivel mundial. En Sudamérica, anualmente las pérdidas originadas a causa de los incendios forestales se han calculado en más de US\$1.600 millones, la cual no incluye todos aquellos costos asociados a la salud, recreación, madera e infraestructura (González-Cabán, 2013). En Chile, se estima que el gasto relacionado al combate de los incendios forestales ha ido en constante aumento en los últimos años, a cifras que se estiman en más de US\$30 millones anuales, sin considerar las pérdidas directas (González et al., 2011).

2.2.1. Factores que contribuyen a la generación de incendios forestales

Para un eficiente combate de incendios forestales es fundamental identificar y analizar de forma clara factores y condiciones que generan los incendios y favorecen su propagación.

Escenario climático: Para las próximas décadas, el escenario climático en Chile, predice una disminución significativa de las precipitaciones y un aumento sostenido de recurrencias en la sequía (CONAMA, 2006). Lo que resultaría en un incremento en la ocurrencia de incendios como también de las áreas afectadas por este. La región mediterránea, sería más vulnerable a los efectos de esta variabilidad debido a que presentan extensas plantaciones, con características homogéneas, que junto a su particularidad en la combustibilidad amplificarían el efecto de los incendios forestales (Contreras, Figueroa, Abarca, & Castro, 2011; González et al., 2011; Carmona, González, Nahuelhual, & Silva, 2012).

Actividades humanas: Se consideran los factores sociales en la generación de los incendios forestales debido a que los humanos son potenciales transformadores del régimen del fuego. Se tiene que en Chile las causas principales casi en su totalidad son de tipo antrópico, las cuales principalmente se asocian a causas accidentales como accidentes de tránsito, recreación, quema de desechos agrícolas entre otras causas, que dan cuenta de más del 58% de los incendios (Hantelhoff, 2010).

Cambios en el uso del suelo: los pastizales son el principal foco de origen de los incendios forestales con un 65% el cual ha ido en aumento en las últimas décadas. Así mismo, los originados por plantaciones forestales también han aumentado en este mismo período. Junto con esto, también la superficie de suelo que se ha ido transformando en terrenos de plantaciones forestales ha ido en constante aumento (ver anexo 1). Esta mayor homogeneidad y continuidad y cantidad de material combustible en las plantaciones forestales masivas parecería estar explicando el incremento sostenido de incendios; (Echeverría et al., 2006; Carmona et al., 2012).

Expansión de la interfaz urbano-forestal: esta zona corresponde al lugar en donde el terreno forestal entra en contacto con zonas urbanas o edificadas (Galiana Martín, 2012). En la cual existen relaciones de intercambio entre ecosistemas sociales y natural-forestales. Donde se mezclan zonas urbanas con cualquier tipo de vegetación potencialmente incendiable, como vegetación herbácea, leñosas, huertos agrícolas, u otros materiales

combustibles (Sirca et al., 2017). Son numerosos los casos en que el fuego ha arrasado grandes superficies de vegetación, destruyendo centros poblados, ocasionando pérdidas humanas materiales y económicas (Castillo, 2013).

2.3. ÍNDICE DE SEVERIDAD DE INCENDIOS FORESTALES

En relación a los incendios forestales, la severidad es una de las variables comúnmente referidas en su caracterización. Su importancia principalmente hace mención a que el nivel o índice de severidad condiciona la respuesta del ecosistema a los efectos del fuego, lo que la convierte en una variable predictiva de gran interés para la gestión de áreas quemadas (A. García et al., s. f.).

En la dinámica de áreas quemadas, el índice de severidad del fuego es comúnmente destacado como un factor crítico. Esto debido a su relación directa con la dimensión de biomasa consumida (Doerr et al., 2006), por esto anterior que el concepto severidad hace referencia principalmente a aquellos efectos del fuego en el medio ambiente, definido comúnmente como la magnitud del cambio ecológico causado por el fuego (Key, 2006).

Bajo la tarea de analizar los tipos de efectos del fuego sobre el medio ambiente, se pueden distinguir dos tipos, los cuales se distinguen en efectos de primer y segundo orden, que se suceden en el continuo temporal, en donde se puede analizar el fuego como perturbación (Graham et al., 2004).

2.3.1. Efectos de primer orden

Hacen referencia al cambio inmediato sobre aquellos componentes o condiciones pre existentes, es decir, corresponden al resultado directo del proceso de combustión, estos resultados son referidos por severidad del fuego o como severidad del incendio a corto plazo (Key, 2006). Para llevar a cabo su medición, el tiempo o intervalo de tiempo es relativamente corto, esto debido a que muchos de sus efectos se debilitan y sumado a esto, son alterados por los procesos biofísicos que le suceden, además, son procesos altamente dependientes de los ecosistemas en los cuales ocurren y sumado también a que dependen de las condiciones meteorológicas del medio post-incendio (A. García et al., s. f.).

Algunos autores hacen una distinción entre la evaluación inicial (la cual se ejerce de forma inmediata), y la evaluación extendida (la cual se retrasa hasta la primera estación de crecimiento de la vegetación) (Key, 2006). Este retraso lo que permite, es observar aquellos efectos de primer orden no visibles justo después del fuego, como la mortalidad de la vegetación, pero está al margen del riesgo que muchos efectos hayan desaparecido debido a la acción de vientos y lluvias, como lo es la presencia de cenizas o restos de vegetación quemada (A. García et al., s. f.).

2.3.2. Efectos de segundo orden

En cuanto a los efectos del segundo orden, están relacionados hacia la respuesta de los ecosistemas, principalmente de la regeneración vegetal y la dinámica hidrogeomorfológica. Autores hacen referencia a ellos como severidad del incendio en sentido estricto, severidad del incendio a largo plazo o, simplemente, como respuesta del ecosistema (A. García et al.,

s. f.), y su evaluación, sin un punto de inicio fijo, se puede prolongar durante años y puede también, llevarse a cabo haciendo referencia a las condiciones pre o post fuego (Key, 2006).

En relación a los efectos de primer y segundo orden, se tiene que básicamente su dinámica funciona en base a la premisa que los efectos de segundo orden son en función a los efectos de primer orden y de las características del medio ambiente previo. La severidad del incendio (Burn severity), es función de la severidad del fuego (Fire severity), y es en función de esta relación, que la severidad del fuego se presenta como uno de los parámetros más importantes, por su carácter predictivo hacia la respuesta del ecosistema (A. García et al., s. f.).

2.3.3. ¿Cómo influye la respuesta ambiental de las áreas quemadas?

Según los niveles de severidad del fuego en un territorio, las superficies quemadas se cubren de diferentes materiales en función de la misma. De esta forma, desde el predominio de la vegetación y suelo en áreas no quemadas, se observa una progresiva carbonización en los niveles medios de severidad con la aparición de vegetación y suelos quemados, hasta alcanzar en los niveles de severidad alta, una combustión completa, la cual se manifiesta a través de la ceniza. De esta manera, la presencia de diferentes superficies quemadas de las cubiertas vegetacionales y de suelos ejerce una importante influencia en la respuesta que el ecosistema ejerce a la perturbación ocurrida, y así, dirigir procesos edáficos y de regeneración vegetal (A. García et al., s. f.).

La presencia de vegetación post-fuego aumenta los niveles de humedad ambiental, disminuye los niveles de evaporación y promueve la infiltración de agua en el suelo, de esta forma controla la proporción de agua en escorrentía junto con los efectos de erosión. Esto anterior, quiere decir que en un medio ambiente post-fuego, los niveles de escorrentía e infiltración están reguladas por la regeneración de la vegetación (Cancer et al., 2000), lo que provoca que existan descensos en la escorrentía superficial con índices de alrededor de un 18% respecto a aquellos suelos desnudos (Cerdà & Doerr, 2005); por otra parte, se demostró que la presencia de acículas sobre una capa de cenizas no solo, aumenta la capacidad de retención de agua y disminuye la escorrentía con su erosión, sino que también, actúa como un agente protector, incluso en ocasiones de precipitación intensa, lo que favorece la absorción de las cenizas (Cerdà & Doerr, 2008).

El suelo quemado, presenta alteraciones de carácter biológicas, químicas y físicas, eso ocurre como una consecuencia directa de las temperaturas elevadas, pero también con una influencia de carácter indirecto, debido a la incorporación de cenizas (Mataix, 2000). Aquellas perturbaciones biológicas producidas a temperaturas bajas, condicionan el cómo se desarrolla la germinación y el rebrote, los cuales conforman el mecanismo más importante en la regeneración vegetal (A. García et al., s. f.).

A un nivel general, aquellas áreas que fueron quemadas cuyos niveles de severidad se presentaron de la forma más alta, presentaron bajos niveles de regeneración vegetal, lo que podría ser explicado por el efecto de las altas temperaturas, que podrían disminuir la disponibilidad de semillas (Lloret & Salvador, 1995), y producir niveles más altos de mortalidad en plantas rebrotadoras debido a la destrucción de tejidos meristemáticos (Lloret & Salvador, 1995), tejidos que, tienen por función, permitir el crecimiento de la planta en un

sentido longitudinal y diametral; pero, también existen estudios en los cuales se ha demostrado una mejor regeneración en aquellas áreas de mayor severidad, lo que se podría explicar por la mayor cantidad de nutrientes en el medio ambiente post-fuego (Ferran et al., 2002), por el efecto positivo del fuego por sobre la dispersión de las semillas, o a la presencia de aquellas semillas refractarias, las cuales necesitan del calor para despertar de su estado latente (Keeley, 1991).

Al incorporarse cenizas al suelo, aumenta su pH, debido a los niveles de óxidos, hidróxidos y carbonatos que estas contienen. Por otra parte, la deposición de cenizas supone un retorno hacia el suelo de aquellos nutrientes liberados en el proceso de combustión de la vegetación, lo que explica el aumento temporal en los niveles de fertilidad que se produce inmediatamente post-fuego, que por una parte favorece la regeneración de la vegetación, y por otra, la regeneración de la materia orgánica (Badía & Martí, 2003). Pero, luego de las primeras lluvias, la gran mayoría de los cationes básicos de las cenizas se disuelven, y promueve una disminución de pH, que aumenta la probabilidad de disolución de materiales pesados presentes en estas, lo que podría provocar una toxicidad del suelo (Bodí et al., 2010).

2.4. ÍNDICE VEGETACIONAL EN LA TELEDETECCIÓN

La teledetección otorga grandes posibilidades a la hora de llevar a cabo investigaciones acerca de la naturaleza, a pesar que aún se trabaja en la mejora y perfeccionamiento de productos a nivel de resolución espacial, temporal y espectral de los datos obtenidos (Sacristán, 2006), la teledetección, por finalidad tiene tanto identificar como caracterizar materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren, todo a partir de la radiación electromagnética procedente de la misma, entendiendo como tal, tanto la que emite la superficie terrestre, como la reflejada que le llega al sol (J. García et al., 1997). El análisis de la vegetación y la detección de la dinámica en como sus patrones van evolucionando, son importantes para la evaluación de recursos naturales, como también de su monitoreo.

Al hablar de índices de vegetación, se puede definir como un parámetro, calculado a partir de los diferentes valores de reflectancia de las distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal; también, hace referencia a un cifra que se genera por alguna combinación de bandas espectrales, y que puede tener relación con la cantidad de vegetación presente en algún pixel dado (Muñoz, 2013). Se usan básicamente para establecer una mejora en la discriminación entre suelo y vegetación, reduciendo el relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas.

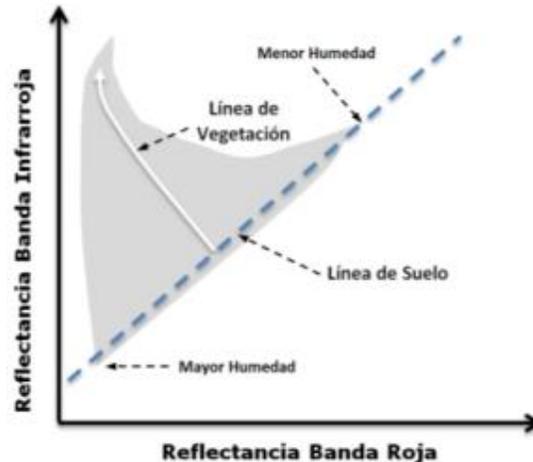
Valores bajos en los índices de vegetación, por lo general presentan vegetación con características de poco vigor, mientras que aquellos valores altos hacen referencia a vegetación muy vigorosa (Muñoz, 2013).

2.4.1. NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado)

Es uno de los índices más utilizados para la evaluación de la vegetación, esto debido a su sencillez del cálculo, además de disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), y

una sensibilidad alta en las bandas infrarrojas, lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes (ver Figura 5). Valores muy bajos en el NDVI, del orden de 0,1, hacen referencia a áreas rocosas, arenosas o nevadas; y valores altos, del orden de 0,2 a 0,3 pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales (EOS, s. f.).

Figura 5: Reflectancia de vegetación.



Fuente: Muñoz (2013).

Este indicador se calcula con una operación en la cual se une la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR), y la reflectancia de la parte roja visible (RED), bajo la siguiente fórmula:

Figura 6: Fórmula de cálculo de índice vegetacional.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

NIR - Espectroscopía de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano
 RED - Espectroscopía de Reflectancia de la parte Roja Visible

Fuente: EOS (s.f).

En palabras sencillas, el NDVI, es una medida de estado fitosanitario, el cual se basa en la forma en que una planta refleja la luz en ciertas frecuencias (EOS, s. f.). Es en este sentido, en el cual se explica que la clorofila, el que corresponde a un indicador de salud de la planta, absorbe una gran cantidad de luz visible, y su estructura celular en las hojas refleja de forma intensa la luz infrarroja cercana. Cuando una planta se deshidrata, enferma, o se desgasta, el mesófilo esponjoso sufre un deterioro, que provoca que la planta absorba más luz infrarroja cercana en lugar de reflejarla; así, de la forma en como varía la NIR en comparación con la luz roja (ver anexo 5), otorga una indicación precisa de la presencia de clorofila, que está directamente relacionada con la salud de las plantas (EOS, s. f.).

2.5. IMPACTOS DE LAS PLANTACIONES FORESTALES EN EL MEDIO AMBIENTE

Algunas de las grandes ciudades del mundo han tenido la responsabilidad de proteger los bosques nativos a lo largo de sus cuencas, debido a que estos contribuyen a asegurar la calidad, cantidad y suministro de agua; no así, las plantaciones forestales, debido a que estas disminuyen la disponibilidad de agua (mientras que el bosque nativo las incrementa). Es en este sentido, que aquellas plantaciones comerciales de Pino y Eucaliptus carecen de efectividad para enfrentar y mitigar el cambio climático, ya que están sujetas a ciclos cortos de rotación, por lo que no fijan el carbono a largo plazo (Salinas, 2019), por otra parte, también provocan variados impactos, como por ejemplo reducir la disponibilidad de agua, aumentar el número de incendios, favorecen la erosión de los suelos y sedimentación de cursos de agua, pueden provocar la pérdida de biodiversidad, son susceptibles a las plagas. (Salinas, 2019).

Otras de las características de las plantaciones forestales, es que tanto Pinos, como Eucaliptus y Aromos a lo largo del tiempo han evolucionado en ambientes en donde incendios son parte natural de los ecosistemas, por lo cual estas especies incorporaron al fuego como parte de sus mecanismos de regeneración, contienen aceites y alcoholes inflamables y por consiguiente, aumentan tanto la incidencia como la severidad y propagación de incendios (Salinas, 2019).

Es por lo anteriormente mencionado, que al existir incentivos para la reforestación, estos deben estar enfocados principalmente a la recuperación de vegetación de carácter nativa y ecosistemas naturales. Por lo que se debe tener en cuenta que la premisa “mientras más árboles, mejor” no es acertada, debido a que puede tener severas consecuencias en el desarrollo de la salud de los bosques, el agua disponible, proteger el clima y la salud de las personas. Por otra parte, también se debe tener en cuenta que plantaciones forestales no albergan biodiversidad (Salinas, 2019).

2.5.1. Chile “carbono neutral”

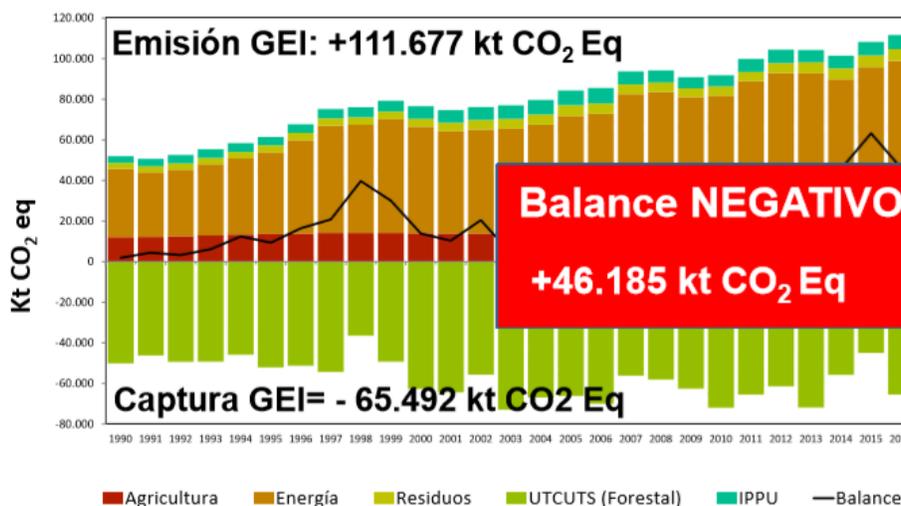
El Gobierno de Chile, pretende que el país hacia el año 2050, sea el primero en vías de desarrollo en lograr la meta de ser carbono neutral. Esto anterior en un contexto que da cara a la COP25 que se realizará en Madrid, en el cual, es un anteproyecto de ley marco de cambio climático en el cual trabaja el Ministerio de Medio Ambiente, cuyo objetivo principal consiste en que al año 2050, Chile pueda o tenga la capacidad de absorber tanto dióxido de carbono (CO₂), como el que genera (Marchetti, 2019).

Es una iniciativa en la cual trabajan diversos países, como Noruega, Suecia, Reino Unido, Francia, España y Nueva Zelandia, en los cuales se han propuesto diversas fechas para cumplirse, pero todos los países concuerdan en metas similares, como reducir emisiones por parte de medios de transporte, forestación, compromisos en el sector privado, tratamiento de residuos, y energías renovables. Además, en el caso nacional, se exigirá al sector minero reducir sus emisiones de contaminantes, y el primer foco a trabajar será el tema competente a la reforestación del país (Marchetti, 2019).

Esto anterior, debido a que Chile (tal como se observa en la

Figura 7), tiene un balance negativo en cuanto a la absorción de gases de efecto invernadero en relación a la emisión, es decir, posee más emisiones que absorción, por lo que se debe trabajar sobre más de 45 mil kilotoneladas de CO₂ que se deben reducir o absorber por año para lograr una emisión cero (Marchetti, 2019).

Figura 7: Balance nacional de Gases de Efecto Invernadero.



Fuente: Comisión del futuro, ciencia, tecnología e innovación (2019).

Es por esto anterior, que se plantea que para lograr una emisión cero, se debe reforestar el territorio nacional con una suma total de 2 millones de hectáreas de bosques, entre los cuales se destaca el desarrollo de 4 tipos de estos: Áreas de protección y parques naturales, bosques nativos con un plan de manejo sustentable, bosques de producción de maderas y fibras, y arbolado urbano y rural. Esto anterior, se debe sumar al hecho que en el territorio total nacional, 24% de este corresponde a bosques, entre los cuales 14,6 millones de hectáreas corresponden a bosque nativo; 2,2 millones a bosques plantados; y 33,8 millones de hectáreas a terrenos de aptitud forestal, lo que provoca que el 44,6% del total del territorio nacional referido a bosques, sean plantaciones forestales de exportación (Comisión del futuro, ciencia, tecnología e innovación, 2019).

A continuación, en la siguiente tabla (ver Tabla 5), se exponen los principales desafíos del nuevo plan de reforestación en Chile.

Tabla 5: Desafíos plan de reforestación en Chile.

Desafíos actuales	
1. Volver a forestar	2 millones de hectáreas reforestadas como meta.
2. Manejo sustentable de bosque nativo	Conservación biodiversidad y fuente de biomateriales, medicina y biodiversidad para el futuro.
3. Evitar incendios forestales	Disminuir tasas de cantidad y severidad de incendios forestales.
4. Abastecimiento Pymes aserrío	Abastecimiento de materia prima para PYMES e incorporación de nuevas especies, tecnologías y canales de exportación para aumentar productividad de aserraderos.
5. Seguridad operaciones	Disminuir atentados contra trabajadores, maquinarias y predios forestales.
6. Biomasa de nueva generación	Fomentar uso de bioenergía, aumentar el volumen de producción y modernización de biocombustibles en base a respaldo científico y fiscalización.
7. Valor compartido comunidades	Trabajos en colaboración entre privados y comunidades.
8. Ciudades de madera	Iniciativa que sigue el ejemplo de países como Canadá, EE.UU, Australia, N. Zelandia.
10. Fibras papel y textil	Fortalecimiento de la producción fibras para la elaboración de vestuario y papel.
11. Formación capital humano avanzado	Fomentar en la población, la educación científica en base a nuevos conocimientos sobre tecnologías que fomenten la educación forestal.
12. Generación de nuevo conocimiento	Siempre estar a la vanguardia con nuevos conocimientos y técnicas de producción y conservación de bosques.

Fuente: Elaboración propia en base a información recopilada de Comisión del futuro, ciencia, tecnología e innovación (2019).

Es por lo expuesto anteriormente, que el proyecto Chile “carbono neutral”, tiene por objetivo central, evitar tener valores positivos de emisiones de contaminantes hacia la atmósfera, disminuir efectos del cambio climático y disminuir cantidad y severidad de incendios forestales, pero por medio de un plan que está enfocado principalmente a una reforestación de bosques, pero apuntando hacia el desarrollo y potenciamiento de la industria forestal, con todo lo que a esta actividad económica involucra.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. ESPACIALIZACIÓN Y SEVERIDAD DE INCENDIOS FORESTALES

3.1.1. Espacialización

Existen diversos estudios que hablan de diferentes técnicas de análisis de imágenes mediante teledetección, las cuales pueden ser aplicadas a la espacialización y análisis de incendios forestales y otros fenómenos físicos que desarrollan en la superficie terrestre (Casella et al., 2018), los que han sido trabajados mediante diversos sensores y satélites, como MODIS y Landsat. El lanzamiento de la misión Sentinel-2 de la European Space Agency (ESA), abre nuevas perspectivas para el uso en el estudio de incendios, esto debido a su superioridad en la resolución espacial, calidad espectral, radiométrica y los tiempos de revisita. Es por esto anterior, que diferentes estudios de incendios muestran su potencial de análisis del territorio, destacando el interés del trabajo en las nuevas bandas del Sentinel-2 (Casella et al., 2018; Fernández-Manso et al., 2016).

La misión Sentinel-2 (S2), de la ESA, corresponde a una constelación compuesta de dos satélites, los que corresponden a “S2A” que fue lanzado el 23 de junio de 2015; y el “S2B” que tuvo un lanzamiento el 7 de marzo de 2017 (Casella et al., 2018). Cada uno de estos satélites contiene un sensor MultiSpectral Instrument (MSI), el cual cubre un total de 13 bandas (443 nm – 2190 nm), que tienen un resolución de 10, 20 y 60 metros (ESA, 2017). En cuanto a las bandas MSI, en la siguiente tabla se muestran las características principales de cada una.

Tabla 6: Especificaciones técnicas de Sensor SENTINEL-2.

SENTINEL-2 en nivel 1C				
Bandas	Función	Long. de onda central (nm).	Ancho de banda (nm).	Resolución espacial (m).
1	Aerosol costero	443,9	27	60
2	Azul	496,6	98	10
3	Verde	560,0	45	10
4	Rojo	664,5	38	10
5	Infrarrojo cercano – NIR	703,9	19	20
6	Infrarrojo cercano - NIR	740,2	18	20
7	Infrarrojo cercano – NIR	782,5	28	20
8	NIR	835,1	145	10
8a	Infrarrojo cercano – NIR	864,8	33	20
9	Vapor de agua	945,0	26	60
10	Cirrus – SWIR	1373,5	75	60
11	SWIR	1613,7	143	20
12	SWIR	2202,4	242	20

Fuente: Elaboración propia en base a datos arrojados por Casella et al., (2018).

Espacializar incendios forestales mediante procesamiento de imágenes satelitales, se hace posible mediante la visualización de una combinación de bandas, en las que se destaque la vegetación que se encuentre fotosintéticamente activa, las que tienen por característica

espectral, una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (Instituto Nacional de Técnica Espacial, s. f.), y baja en el rango visible (Alonso, 2019). Es debido a esto anterior, que en primera instancia, se debe llevar a cabo una combinación de bandas en “falso color”, la cual se realiza en Software ArcGis, y une las bandas números “8, 4 y 3”, donde:

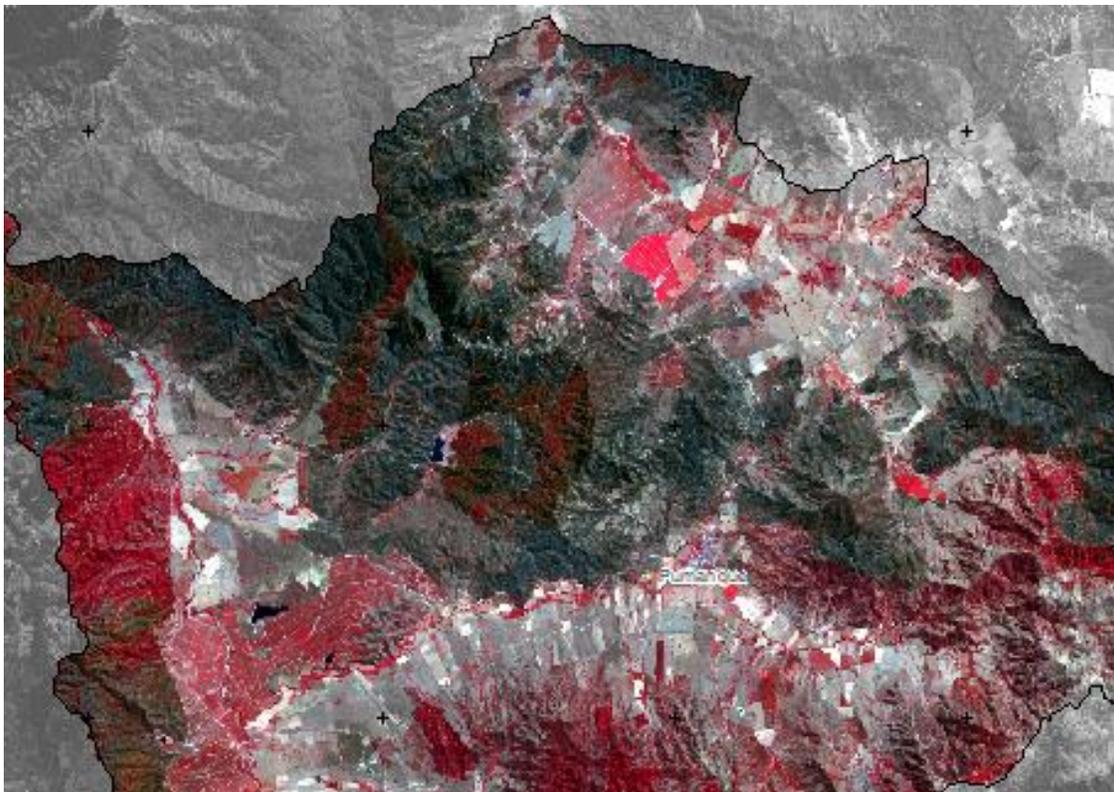
I.- Banda nº8: Corresponde a la del infrarrojo cercano o próximo, la que se representa y visualiza en color rojo.

II.- Banda nº4: Correspondiente a la banda roja, se representa y visualiza en color verde.

III.- Banda nº 3: Correspondiente a la banda verde y se visualiza en color azul.

Según el resultado, de esta operación, una vez llevada a cabo mediante la composición de las bandas, se destacará la vegetación viva en color rojo, por sobre sombras, agua (representadas en colores oscuros), y suelos desnudos (que se representarán en colores más claros). Aquellas zonas quemadas, se representarán con colores oscuros en la composición de falso color (ver Figura 8), esto debido a la abundancia de materia orgánica carbonizada (Alonso, 2019), presente en la superficie afectada.

Figura 8: Ejemplo de una imagen falso color con combinación RGB 843.



Fuente: Elaboración propia.

Se utilizará como base de información, una imagen provista por el sensor Sentinel-2, descargada de la plataforma Google Earth Engine, la cual corresponderá a una imagen que esté disponible correspondiente a la fecha de término de los incendios forestales en la

comuna de Pumanque, es decir el 1 de marzo de 2017, que se trabajará mediante Software ArcGis; y una vez llevado a cabo el proceso de composición de bandas, se ejecutará un “análisis visual” y posterior digitalización de áreas quemadas, de manera tal, que los incendios ocurridos en la comuna de Pumanque que se hayan observado, sean delimitados correctamente y digitalizados en formato Shapefile de polígono; esto anterior, con el fin de evaluar en primera instancia, el número de incendios totales ocurridos, como también la cantidad de superficie afectada estimada en hectáreas según cada uno de ellos, y en relación a la superficie total comunal.

Para apoyar el trabajo anteriormente mencionado, se llevará a cabo un procesamiento extra, el que consiste en establecer una imagen del área de estudio en color verdadero (combinando las bandas 4, 3 y 2), tanto pre-incendio como post-incendio, el cual permita elaborar un análisis visual que apoye la imagen de reflectancias en falso color, así, apoyar en la delimitación de los incendios que afectaron a la comuna, en aquellas áreas donde valores de reflectancia sean confusos.

Con esto anterior, queda completa la primera parte del resultado del objetivo 1, la cual hace referencia al catastro y espacialización de los incendios forestales ocurridos en la comuna de Pumanque, durante período de verano de 2017.

3.1.2. Índices de severidad

Para llevar a cabo la segunda parte de este objetivo, haciendo referencia al desarrollo del cálculo de índice de severidad de los incendios digitalizados en el paso anterior; esta se guiará en la metodología propuesta por Key & Benson (2005), la cual se basa principalmente en la utilización de dos imágenes, que corresponden a las disponibles de antes y después del período de incendios en Pumanque, provistas por sensor Sentinel-2.

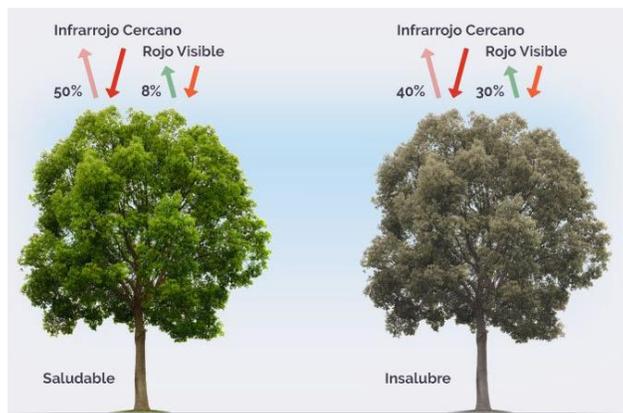
Haciendo referencia al período pre-incendio, se descargó una imagen correspondiente al 1 de noviembre de 2016; mientras que la imagen post-incendio (con la cual se trabajó en la digitalización de los incendios), corresponde al 1 de marzo, fecha la cual, se dejó de observar mediante la dinámica de la plataforma, actividad relacionada a incendios dentro de la comuna, lo que permite definir el período de análisis pre y post.

Es en este sentido, que mediante el procesamiento de incendios mediante teledetección, para el cálculo de índices espectrales como NDVI o NBR, entre otros (Caballero et al., 2017), se llevan a cabo formulaciones matemáticas similares, las que corresponden a restas entre reflectividades de dos bandas, las que son divididas por la suma de las reflectividades de esas mismas bandas. De forma general se pueden denominar como índices espectrales de diferencia normalizada, y se diferencian entre ellos por diferentes combinaciones de bandas en su formulación (Fernández-Manso et al., 2016).

Cuando se habla de índice NBR, se habla del resultado de normalizar diferencia entre reflectancias entre una banda del infrarrojo cercano y una del infrarrojo medio; dicho contraste de reflectancias, hace referencia a la presencia de vegetación viva, la cual es muy reflectiva en el infrarrojo cercano (y en menor medida en el infrarrojo medio); mientras que aquella vegetación que si ha sufrido daños, posee cada vez valores de reflectancia más bajos en la banda del infrarrojo cercano y más altos en el medio (ver Figura 9). Es por esta

forma, que en la evaluación de áreas quemadas y su severidad, al calcular el índice NBR, valores bajos hacen referencia a una alta severidad (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, s. f.).

Figura 9: Diferencias reflectancia entre vegetación sana y alterada.



Fuente: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (s.f.).

Se utilizó como marco, un archivo en formato Shapefile georreferenciado, descargado de la plataforma de la Biblioteca del Congreso Nacional, el cual que demarca los límites de la comuna de Pumanque, para recortar mediante Software Arcgis las imágenes satelitales recolectadas y de esta forma, trabajar solamente a nivel comunal y comprobar que todas las imágenes tengan las mismas dimensiones; luego de esto se procede a calcular el Índice NBR (Normalized Burn Ratio), el cual aporta información sobre las áreas quemadas, con el cual se puede analizar también, la severidad del fuego. Este índice se calcula con la ecuación:

Ecuación 1: NBR.

$$NBR = (R_{nir}(8) - R_{swir}(12)) / (R_{nir}(8) + R_{swir}(12))$$

Fuente: Fuente: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (s.f.)

En donde R_{nir} corresponde a la reflectividad de la banda NIR; y R_{swir} la reflectividad de la banda del SWIR, los que para el caso de Sentinel-2, corresponden a banda 8 en el NIR, con una resolución espacial de 10 metros; y banda 12 en el SWIR, con una resolución de 20 metros. La ecuación anterior, se aplica mediante el comando de "calculadora raster" en software Arcgis sobre ambas imágenes satelitales recolectadas, es decir, las correspondientes a pre-incendio y post-incendio.

Por otra parte, para la elaboración de la evaluación de áreas quemadas, se puede llevar a cabo una comparación mediante calculadora raster, del NBR de las dos imágenes (pre y post- incendio), así evitar tomar en cuenta aquellas superficies que no corresponden a áreas quemadas pero que sin embargo, poseen un bajo NBR, como suelos desnudos o caminos y ciertas superficies brillantes), así, permitir un análisis que sólo se reduce a superficies que han cambiado tras la ocurrencia del incendio. A este índice se le denomina

dNBR (Differenced Normalized Burn Ratio), el cual se calcula por medio de la siguiente operación:

Ecuación 2: dNBR.

$$dNBR = NBR(pre - incendio) - NBR(post - incendio)$$

Fuente: Fuente: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (s.f.).

Corresponde a resta simple entre el NBR pre-incendio y NBR post-incendio; y que varía entre -0.5 y +1.3. Estos valores anteriores, en relación a los más negativos, indican una vegetación regenerada; aquellos valores entre -1 y +0.99 indican vegetación o zonas no quemadas; y aquellos valores positivos, indican zonas afectadas, que pueden aumentar en la severidad de los impactos. (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, s. f.).

Una vez llevados a cabo los procesos, se tendrán imágenes en formato raster, en los cuales se podrán ver espacializados los territorios en los cuales los incendios forestales se llevaron a cabo junto a los índices de severidad, correspondientes a cada uno de los espacios. Para la jerarquización de las categorías o niveles de severidad (NS), se tomarán en cuenta según Casella et al., (2018), 5 categorías, las que se adaptaron de la metodología de Key, (2006), las que luego de ser aplicadas se transformarán a formato shapefile mediante Software Arcgis y para llevar a cabo un posterior análisis cuantitativo de la superficie afectada según categorías de severidad; las que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7: Categorización de severidad.

Categoría	Nivel de severidad	Valores del dNBR
1	No quemado	<0,1
2	Leve	0,1 a 0,27
3	Leve a moderado	0,27 a 0,44
4	Moderado a severo	0,44 a 0,66
5	Severo	>0,66

Fuente: Elaboración propia en base a metodología de severidad de Key (2006).

Es por lo explicado anteriormente, que para el desarrollo de este objetivo se tomará en cuenta el siguiente diagrama metodológico resumen, el cual resultará en un análisis a nivel comunal del catastro y la severidad de los incendios forestales ocurridos en Pumanque durante el período comprendido entre el 6 de noviembre y 1 de marzo.

Tabla 8: Tabla resumen objetivo 1.

Objetivo 1	Catastro, espacialización y cálculo del índice de severidad de incendios forestales en la comuna de Pumanque, ocurridos en verano del año 2017, por medio de sensor SENTINEL 2.
Fuente	Secundaria
Herramienta	ArcGis, Google Earth Engine
Método	Recopilación y procesamiento de información
Producto	Cartografías de la comuna de Pumanque, con la espacialización de incendios forestales ocurridos en verano de 2017. Cartografías de la comuna de Pumanque, con los índices de severidad de los incendios digitalizados durante verano de 2017.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. IMPACTOS DE LOS INCENDIOS EN USOS DE SUELO Y VIVIENDA

Los incendios forestales tienen una repercusión directa sobre procesos ecológicos, esto anterior debido tanto a la variabilidad del paisaje, como de las diferentes respuestas de la vegetación presente (Greenbaum et al., 2016). Haciendo referencia a los recursos forestales, la frecuencia de los incendios, puede ocasionar variables modificaciones en las dinámicas de cultivo como el bosque, debido a que un alto índice de especies no alcanzan su etapa de madurez, provocando incluso, la extinción de especies (Greenbaum et al., 2016), Por otra parte, el aumento de las frecuencias de incendios a lo largo de los años, sumado al constante aumento de severos períodos de sequía, puede generar diversos impactos ambientales a largo plazo, impactos que hacen referencia principalmente a una disminución de la productividad de diferentes ecosistemas y el avance de la desertificación (Schroter, 2005); Por otra parte, también tienen un impacto directo en los medios sociales y económicos, haciendo referencia a la pérdida de viviendas e infraestructuras como consecuencia de la ocurrencia del desarrollo de estos incendios forestales (Corporación Nacional Forestal, s. f.-a), de tal manera, que inciden de forma directa en múltiples dimensiones.

Es por lo anteriormente mencionado, que se hace necesario establecer cuáles han sido las repercusiones físicas de los incendios y su severidad en las diferentes coberturas y usos de suelo presentes en el área de estudio, esto debido a la necesidad de comprender los niveles de impacto de estos fenómenos tanto en la dimensión natural haciendo referencia a las coberturas de suelo, como también evaluar la dimensión social, haciendo referencia al impacto ejercido a las viviendas dentro del área de influencia de los incendios.

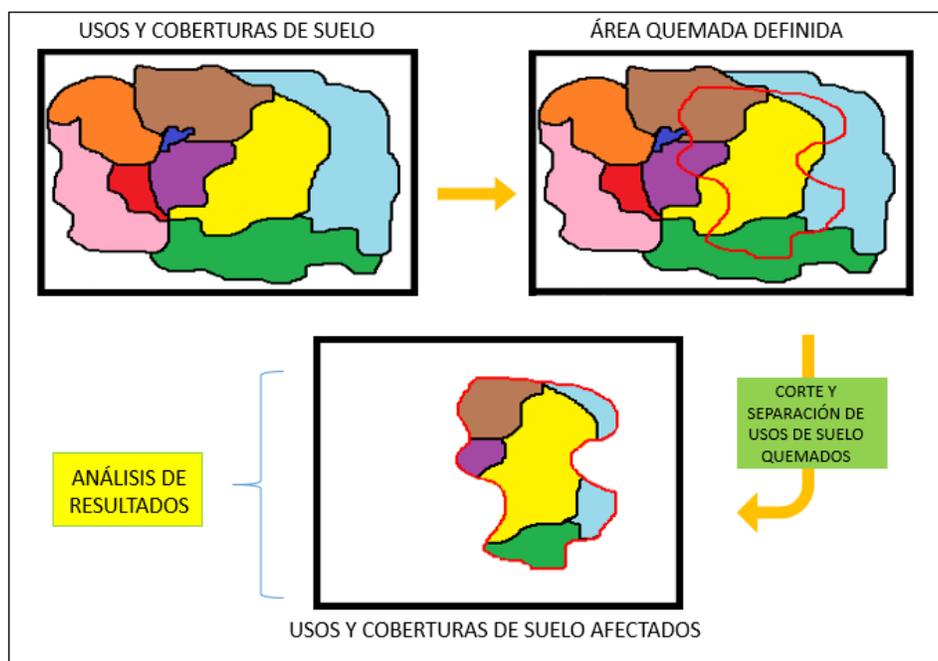
3.2.1. Impactos en los usos y coberturas de suelo

Para esta sección de resultados, se llevará a cabo una combinación de información obtenida del objetivo anterior, haciendo referencia tanto a los polígonos de áreas

quemadas, como también los índices de severidad de las mismas. Sumado a lo anterior, se incorporará información sobre usos y coberturas de suelos a nivel nacional, del año 2013 (el cual corresponde al catastro más actualizado disponible para la región del Lib. Bernardo O'Higgins), las cuales fueron obtenidas mediante la base de datos de la oficina virtual de la CONAF, que corresponde a una entidad de derecho privado, la cual depende del Ministerio de Agricultura, la que, tiene por función principal, administrar la política forestal en Chile y fomentar su desarrollo (Corporación Nacional Forestal, s. f.-b).

Se procesará la información (siguiendo la secuencia de la figura 10), mediante software Arcgis, en el cual se cortará la información de usos de suelo provistas por la CONAF del año 2013, en base a los polígonos de áreas quemadas que fueron elaborados mediante combinación de bandas del sensor Sentinel-2(1C), lo cual tendrá como resultado, un archivo en formato "shapefile", de áreas quemadas de la comuna de Pumanque, junto a una delimitación de la información de usos de suelo, la cual sólo se reducirá a contener la información referente a aquellos espacios que forman parte de los polígonos de áreas quemadas.

Figura 10: Esquema de delimitación de usos y cobertura de suelo quemados.



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo esto anterior como base, se ordenará, dividirá y espacializará la información, según los distintos usos de suelo que se presenten en las áreas quemadas y se llevará a cabo un cálculo de superficie y análisis de cada uno de ellos, con énfasis en aquellos usos que tuvieron lugar en espacios donde los índices de severidad fueron más severos, de manera tal, que se puedan determinar ciertos patrones espaciales. Los distintos usos de suelos presentes en el catastro de la CONAF del año 2013, se presentarán en la siguiente tabla.

Tabla 9: Tipos de usos y coberturas en la comuna de Pumanque.

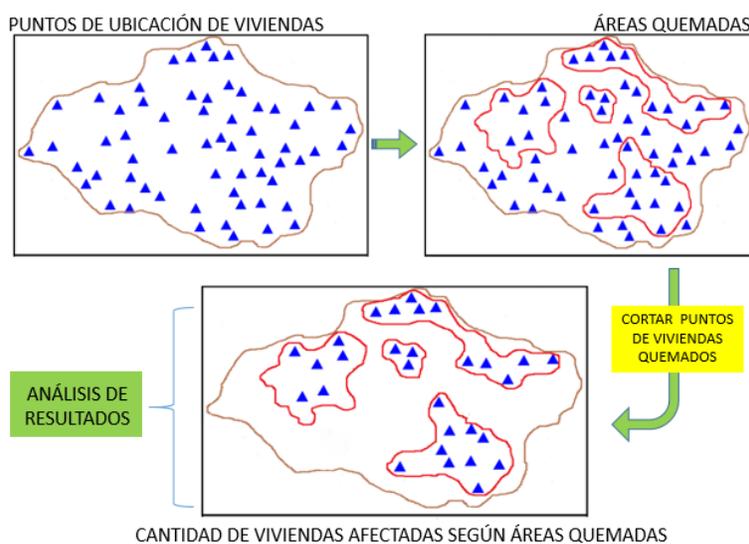
	Usos y coberturas de suelos
1.	Áreas urbanas e industriales
2.	Praderas y matorrales
3.	Terrenos agrícolas
4.	Bosque nativo
5.	Bosque Plantaciones
6.	Cuerpos de agua
7.	Áreas sin vegetación

Fuente: Elaboración propia en base al catastro de usos y coberturas de suelo de la CONAF (2013).

3.2.2. Impactos en la vivienda

En esta sección, se tomará como base la misma información obtenida del objetivo anterior, que hace referencia al archivo “shapefile” de polígonos de áreas quemadas, pero unido a una base de datos obtenidas mediante el sistema de transparencia del INE, el cual contiene datos georreferenciados de las viviendas rurales de la comuna de Pumanque, actualizados en un catastro realizado en la comuna en el año 2016, representados en forma de “shapefile” de puntos. Se lleva a cabo un corte de los puntos de viviendas rurales en base a cada los polígonos de cada una de las categorías de severidad de incendios calculadas (tal como se observa en la secuencia de la Figura 11), De esta forma, al llevar a cabo los procesos, se tendrá como resultado, tanto los usos y coberturas de suelo afectados por cada índice de severidad, como también reconocer la cantidad de viviendas rurales que se encuentran expuestas en cada una de las categorías de severidad en relación a la cantidad total de viviendas presentes en el área general de incendios y total comunal , de manera tal de elaborar un análisis con la información resultante, y determinar ciertos patrones espaciales de severidad, y el posible alcance del impacto.

Figura 11: Esquema de delimitación de viviendas afectadas.



Fuente: Elaboración propia.

Para terminar, se llevará a cabo una cartografía general de impactos de los incendios forestales en la comuna de Pumanque, en las áreas quemadas, en la cual se englobe los resultados de los impactos en los usos de suelo, como también involucrar la totalidad de las viviendas afectadas, con lo que el segundo objetivo de la investigación, se encontraría completo.

Tabla 10: Tabla resumen objetivo 2

Objetivo 2	Evaluación del impacto de los incendios forestales en los distintos usos de suelo y vivienda en la comuna de Pumanque.
Fuente	Secundaria
Herramienta	ArcGis
Método	Recopilación y procesamiento de información
Producto	Cartografías de las áreas quemadas junto a los usos de suelo afectados en la comuna de Pumanque. Cartografía de la ubicación de las viviendas rurales a nivel comunal. Cartografías de las viviendas y usos y coberturas de suelo afectados según índices de severidad de los incendios de la comuna de Pumanque.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VEGETACIÓN QUEMADA PRE Y POST-INCENDIO, PERÍODO 2009 Y 2019.

Conocer el comportamiento de la vegetación en un área determinada permite reconocer y analizar cómo esta ha ido evolucionando en diferentes escalas temporales, además de analizar efectos de diferentes fenómenos en la superficie vegetal terrestre, tales como algunos efectos del cambio climático como la sequía; o actividades ganaderas (Bolaños-González et al., 2011), como también permitir el análisis del impacto en la vegetación y biomasa de incendios forestales en puntos específicos.

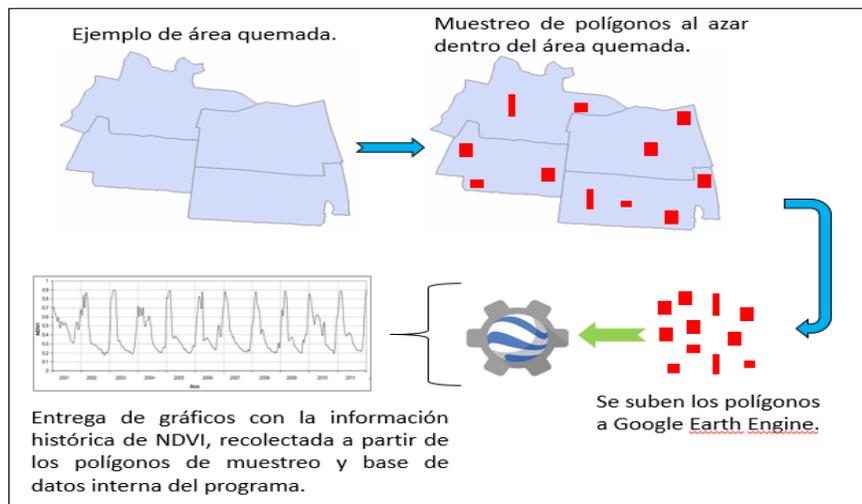
Como se mencionó en el marco teórico, cuando se habla de índices de vegetación, básicamente corresponde a un parámetro que se calcula a partir de valores de reflectancia de longitudes de onda captadas por un sensor a partir de combinación de bandas espectrales, que son sensibles a la cubierta vegetal, y que tiene relación directa con la cantidad de vegetación presente en un pixel (Muñoz, 2013), los cuales presentan variaciones durante el año, debido a las diferentes condiciones físicas, ambientales o climáticas que se pueden presentar en un territorio determinado.

Es por esto anteriormente mencionado, que para el desarrollo de este objetivo, es decir, para reconocer el comportamiento de la vegetación en el área quemada de la comuna de Pumanque, se recopilará una base de datos de índice de vegetación (NDVI), mediante la plataforma Google Earth Engine en período que abarca desde el 1 enero de 2009 y 29 de

agosto del año 2019 (fecha en la cual se recopilaron los datos), de manera tal de obtener una base de datos que incluya información de vegetación pre-incendios del año 2017, su comportamiento durante período de incendios, y también, cómo han ido evolucionando los índices hasta el período actual.

Según los resultados del primer objetivo, haciendo referencia a los diferentes índices de severidad encontrados en las áreas quemadas, es que se dividió el área de incendio en en Software Arcgis, en 5 archivos en formato “shapefile” diferentes, que corresponden a la totalidad de rangos de severidad encontrados (no quemado, levemente quemado, leve a moderadamente quemado, moderado a severamente quemado y severamente quemado), los cuales se utilizaron en el objetivo 2, para calcular usos y coberturas de suelo por cada uno de estos índices de severidad. Para el cálculo del índice vegetacional o NDVI (ver Figura 12), se seleccionaron una variedad de sitios al azar, los que fueron convertidos en polígonos diferentes en los archivos shapefile las áreas de cada una de las categorías de severidad mencionadas anteriormente. Como resultado, se tendrán entonces, 5 archivos shapefile distintos, de cada índice de severidad calculado, con una variedad de polígonos construidos al azar por cada archivo.

Figura 12: Esquema de cálculo de NDVI.



Fuente: Elaboración propia.

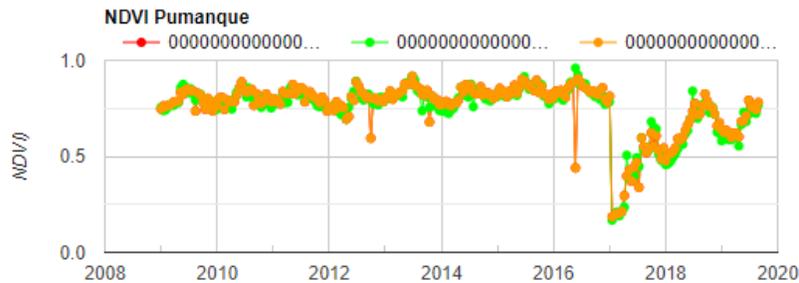
Google Earth Engine, para elaborar el cálculo del índice NDVI posee entre sus funciones, la opción de facilitar la subida de archivos georreferenciados a su plataforma y llevar a cabo diferentes procesos en base a los archivos. En este caso, se subieron los polígonos al azar construidos por cada índice de severidad y se le ordenó al software a partir de un código script, construir un índice NDVI (en base a una base de datos proveniente imágenes captadas por el Sensor Modis-Terra), para cada polígono aleatorio, en un período comprendido entre el 1 de enero de 2009 y 29 de agosto de 2019 (últimos 10 años), con un total de 2 datos de vegetación mensuales que sean calculados cada 16 días, y que se demuestren y guarden en formato tabla, la cual podrá ser descargada en formato Excel. Es decir, se tendrá por cada índice de severidad y sus polígonos construidos de forma

aleatoria, una totalidad de 246 datos de vegetación, categorizados en una escala desde 0.0 a 1.0, en donde aquellos valores más cercanos a 1.0 (cuyo valor expresa el índice de vegetación máximo posible), serán aquellos que representen un mayor NDVI, es decir, un índice de vegetación en superficie mayor; mientras que aquellos cercanos a 0.0 serán aquellos que presenten una ausencia de vegetación en superficie.

Cabe destacar, que se debe subir a la plataforma solamente un índice a la vez, y repetir la totalidad del proceso para cada rango de severidad restante.

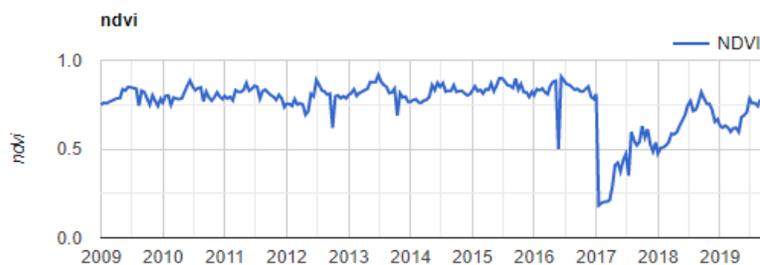
La plataforma arrojará dos bases de datos diferentes, en primer lugar (ver ejemplo Gráfico 2), elaborará un índice NDVI por cada polígono aleatorio subido; y en segundo lugar, una base de datos de los mismos polígonos, pero promediados, el cual es el archivo que se utilizará para elaborar el resultado final (ver ejemplo de Gráfico 3).

Gráfico 2: Ejemplo de base de datos resultante por cada polígono ingresado a Google Earth Engine.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth Engine.

Gráfico 3: Ejemplo de base de datos resultante del promedio del total de polígonos ingresados a Google Earth Engine.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth Engine.

Con los datos ordenados y promediados en formato Excel, se construye el gráfico final de los índices NDVI recopilados, el cual, en una misma figura, englobará todas las reflectancias obtenidas desde enero de 2009 hasta agosto de 2019, lo que permitirá reconocer el estado general de la vegetación en las áreas quemadas de la comuna de Pumanque desde antes de los incendios forestales de 2017 hasta la actualidad.

Tabla 11: Tabla resumen objetivo 3

Objetivo 3	Análisis del comportamiento de la vegetación quemada pre y post-incendio, período 2009 y 2019.
Fuente	Secundaria
Herramienta	ArcGis, Google Earth Engine, Excel.
Método	Recopilación y procesamiento de información
Producto	Gráfico de línea del comportamiento de la vegetación en base a la construcción de índice NDVI para las áreas quemadas según índices de severidad en la comuna de Pumanque.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. ESPACIALIZACIÓN Y CÁLCULO DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD DE INCENDIOS FORESTALES EN LA COMUNA DE PUMANQUE.

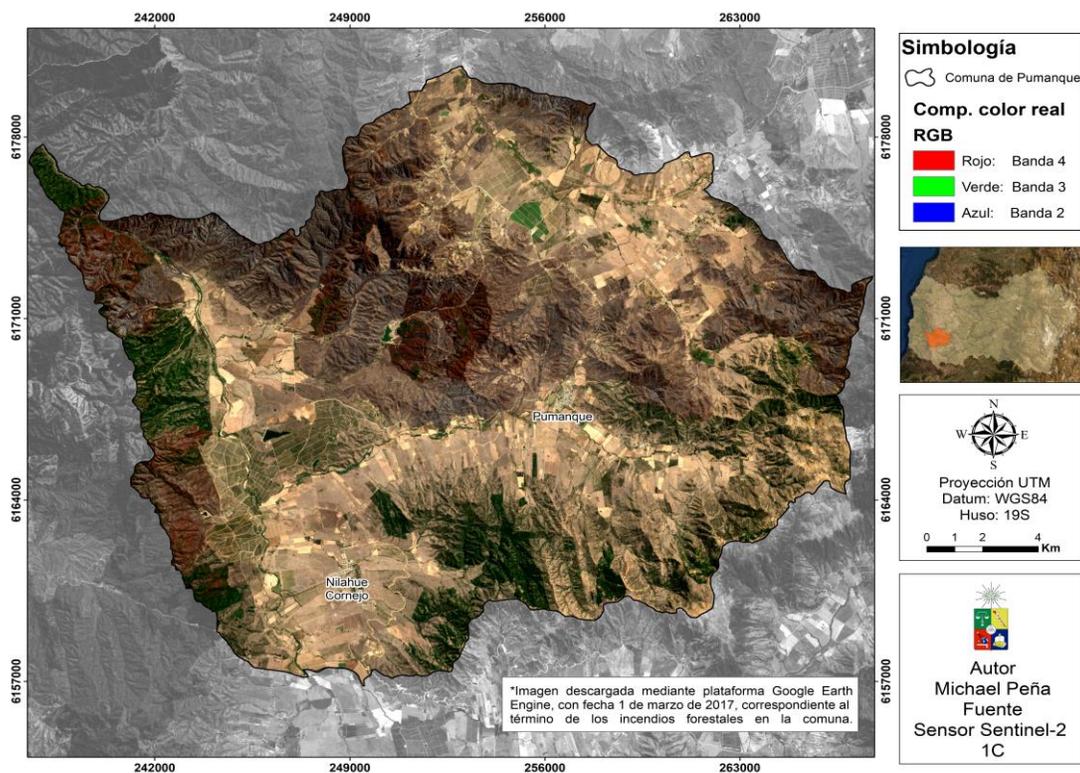
4.1.1. Espacialización y digitalización

Color real y falso color

Al llevar a cabo los procesos propuestos en la metodología, se partirá por mostrar una imagen de la comuna de Pumanque, en la cual se muestra una combinación en color verdadero (bandas 4, 3, 2), en la que se puede apreciar el estado de la comuna una vez terminado el período de incendios forestales.

Hasta el 1 de marzo de 2017 en la comuna, se observan a simple vista (ver Figura 13), bajos índices de vegetación, la cual en el caso de presentarse, se concentra en puntos específicos; como también, una gran mancha de tonalidades oscuras que se presenta en gran parte de la superficie comunal, sobre todo en sectores de relieves elevados como cordones de cerros o colinas, lo que expresa, cuales fueron aquellos espacios donde el fuego actuó durante el periodo de incendios, debido a que la presencia de aquellas manchas oscuras sean parte de restos de vegetación o superficie quemada resultante del período, convertidas en carbón y cenizas.

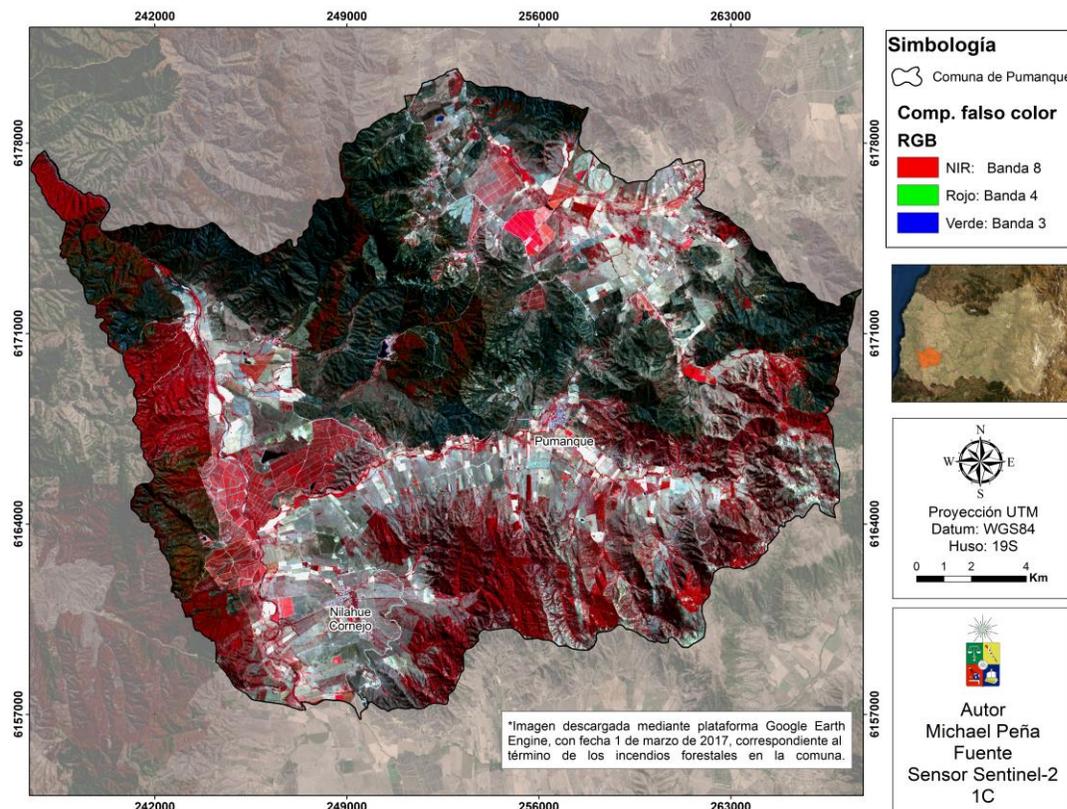
Figura 13: Composición color real post incendio, comuna de Pumanque.



Fuente: Elaboración propia.

Según lo anteriormente expuesto, en relación a aquellas áreas que a simple vista muestran espacios que pudieron ser quemados, se llevó a cabo una composición de bandas en falso color (8, 4, 3), la cual refleja la vegetación que se encuentra fotosintéticamente activa con una alta reflectividad en el infrarrojo cercano y baja en el rango visible (Alonso, 2019). Se muestra en la Figura 14, para el 1 de marzo de 2017, la vegetación viva en color rojo, mientras que aquellos suelos con ausencia de vegetación lo conforman tonalidades claras. Por otra parte, las áreas quemadas se presentan por los colores oscuros debido al alto índice de vegetación carbonizada presente en la zona. Característica que permite reconocer y llevar a cabo la digitalización de aquellos espacios en donde el fuego impactó en Pumanque. Gracias a la composición en falso color y color real, se permiten establecer que aquellos sectores con ausencia de vegetación (expresados con colores claros), corresponden en su mayoría a terrenos agrícolas ubicados en los valles de la comuna, los que se encuentran sin indicios de haber sido impactados por el fuego. Mientras que aquellos espacios con mayor presencia de vegetación carbonizada, corresponden a los ubicados en los cordones centrales de cerros y colinas de Pumanque, en los que, las llamas se habrían propagado. La extensión de los incendios tiene un comportamiento longitudinal de este a oeste, con una concentración en la sección centro-norte de la comuna, debido a que hacia el sur de esta, se presentan reflectancias procedente de vegetación viva que no presenta indicios de haber sido impactada por los incendios forestales.

Figura 14: Composición falso color post incendio, comuna de Pumanque.

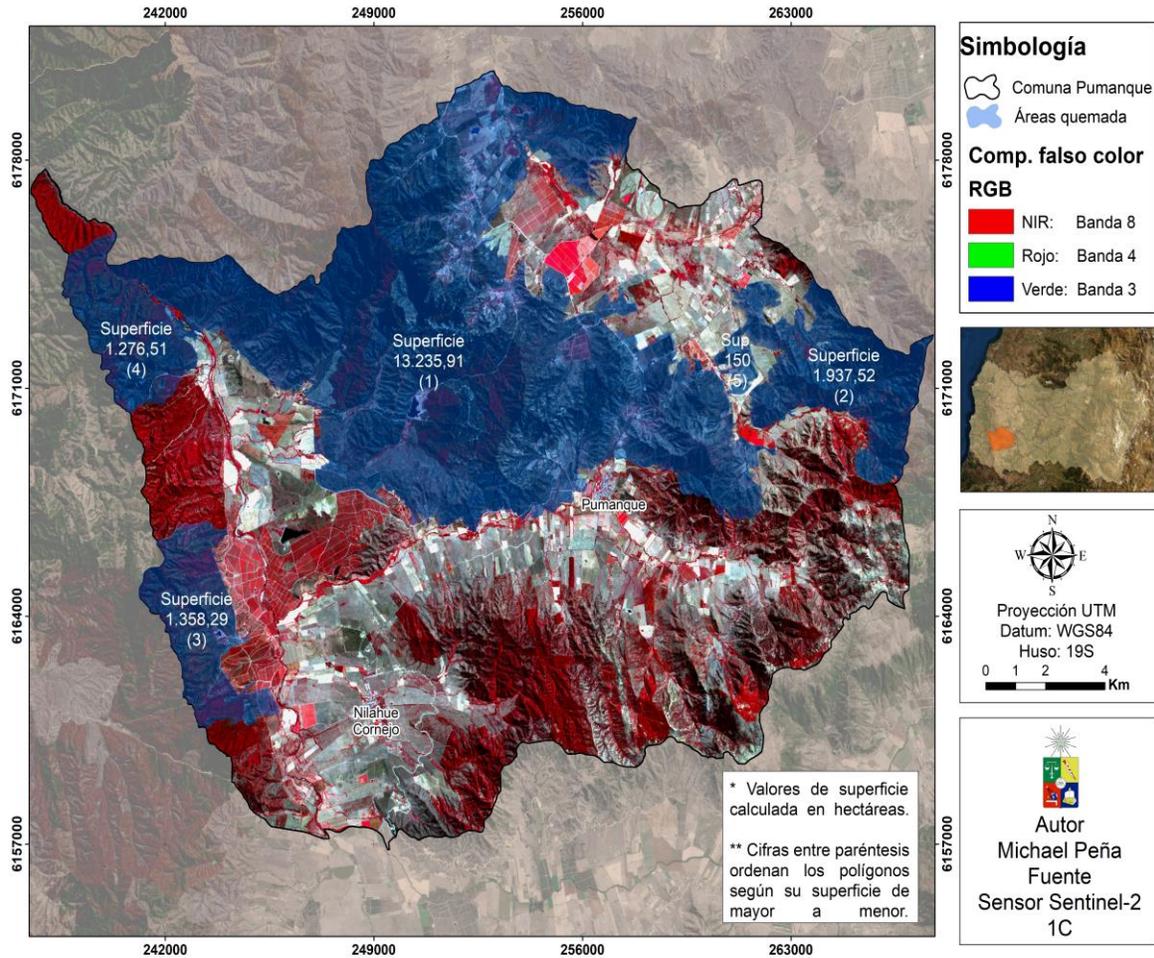


Fuente: Elaboración propia.

Polígonos de áreas quemadas

Tras el pequeño análisis efectuado gracias a la respuesta de la vegetación y su reflectividad, sumado al aporte visual de la imagen en color real de la comuna de Pumanque, es que se procedió a llevar a cabo la digitalización de los polígonos de las áreas quemadas comunal, el cual se muestra en la Figura 15.

Figura 15: Digitalización de áreas quemadas, comuna de Pumanque.



Fuente: Elaboración propia.

Los polígonos digitalizados ocupan un total comunal de 17.958,67 hectáreas de terreno, divididos en 5 polígonos distintos, que oscilan desde 150 a 13.235,9 hectáreas de extensión (ver Tabla 12). La cantidad de hectáreas ocupadas en los 5 diferentes polígonos de áreas quemadas, en relación a la cantidad comunal (44.100), representa un 40,7% de la superficie total comunal, los que se muestran en la siguiente tabla, ordenados de mayor a menor. En relación a los polígonos de mayor tamaño, se tiene que corresponden a superficies ubicadas en relieves elevados como cordones de cerros o colinas, mientras que el de menor tamaño (150 has), lo conforman predios agrícolas hacia el este de la comuna.

Tabla 12: Superficie quemada por polígono digitalizado.

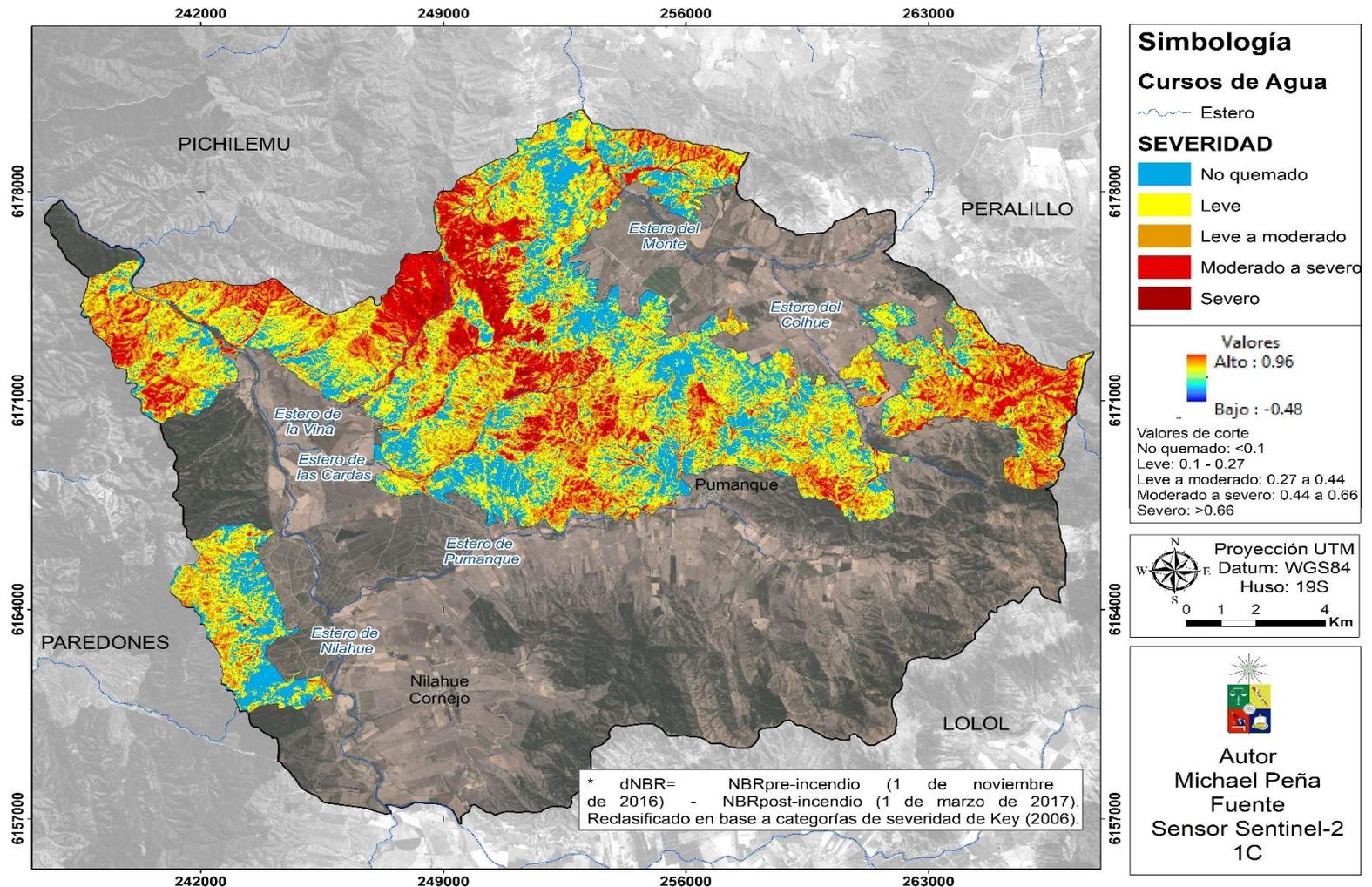
Polígono	Superficie (has)
1	13.235,91
2	1.937,52
3	1.356,29
4	1.276,51
5	150
Total	17.956,23

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Severidad

Tomando como base, la información recopilada anteriormente, en relación a la digitalización de los incendios, como también el procesamiento de imágenes pre-incendio (1 de noviembre de 2016), y post-incendio (1 de marzo de 2017), es que se llevó a cabo el procesamiento para realizar el dNBR, el cual muestra el índice de severidad de los incendios, haciendo relación a los niveles de cambio de la superficie comunal, entre pre-incendio y post-incendio (tal y como se explica en la metodología). Índices que se pueden observar en la siguiente figura.

Figura 16: Índices de severidad de incendio.



Fuente: Elaboración propia.

Según la metodología de Key (2006), de severidad, en los incendios digitalizados en la comuna, se presentan las 5 categorías de severidad, desde no quemado, hasta severo, cuyos valores máximos alcanzan un umbral de 0.96, cercano al máximo que es de 1, que representa la severidad máxima.

Tabla 13: Superficie por índice de severidad.

Categoría de severidad	Superficie polígono (has)	Porcentaje polígono	Superficie comunal
No quemado	4.081,54	22,72%	9,3%
Leve	6.295,47	35,05%	14.3%
Leve a moderado	4.539,85	25,27%	10.3%
Moderado a severo	2.583,12	14,38%	5.9%
Severo	460,68	2,56%	1 %
Total	17.960,66	100%	40.8
<i>Limitante</i>	* Los valores presentan una diferencia de un 0.1% a los expresados en la espacialización de incendios (superficie total de los incendios correspondía a 17.958,67 hectáreas), debido a que al transformar de archivo raster a shapefile, algunos polígonos se suavizan y simplifican, lo que pudo provocar una modificación en la superficie de ciertas áreas ubicadas en los límites o bordes de los shapefile, lo cual sería una limitante para el cálculo exacto.		

Fuente: Elaboración propia.

Según la figura de severidad y la tabla expuesta anteriormente, se tienen algunas variables a considerar.

En el análisis de los índices de severidad, si bien los incendios se presentan a lo largo de toda el área seleccionada, su conformación es heterogénea en el espacio, esto debido tanto a la vegetación, usos y coberturas de suelos presente, como también de las características de la variable topográfica, que, de alguna forma u otra, incidieron en el comportamiento, conformación y índice de afectación de los incendios ocurridos.

En relación a los sitios con menor índice de severidad, estos se presentan en sitios cercanos a predios agrícolas, lo que podría ser explicado por la presencia y quema de una vegetación más ligera y de menor tamaño, que, si bien fue afectada por las llamas, pero su incineración fue rápida y la duración de las llamas también lo fue, lo que podría explicar su índice de reflectancia. Por el contrario, aquellos espacios donde se presentan índices cercanos a la categoría de severo, son aquellos territorios donde la duración del incendio fue mayor, como también la vegetación quemada pudo haber aumentado en altura, la cual podría corresponder a algunos bosques ya sea nativo o plantaciones forestales.

Esto anterior, se plantea desde la base que los incendios forestales ocurridos en la comuna de Pumanque, aumentan su índice de severidad a medida que la altura sobre el nivel del mar aumenta, lo que provoca que aquellos índices más severos se presenten en la cima de cordones de cerros y colinas; y los índices de menor afectación, se presentan en sitios de

menor altura, es decir hacia el valle o llanos agrícolas. Esto anterior bajo la premisa que los usos y coberturas de los suelos, inciden de forma directa en el avance del fuego.

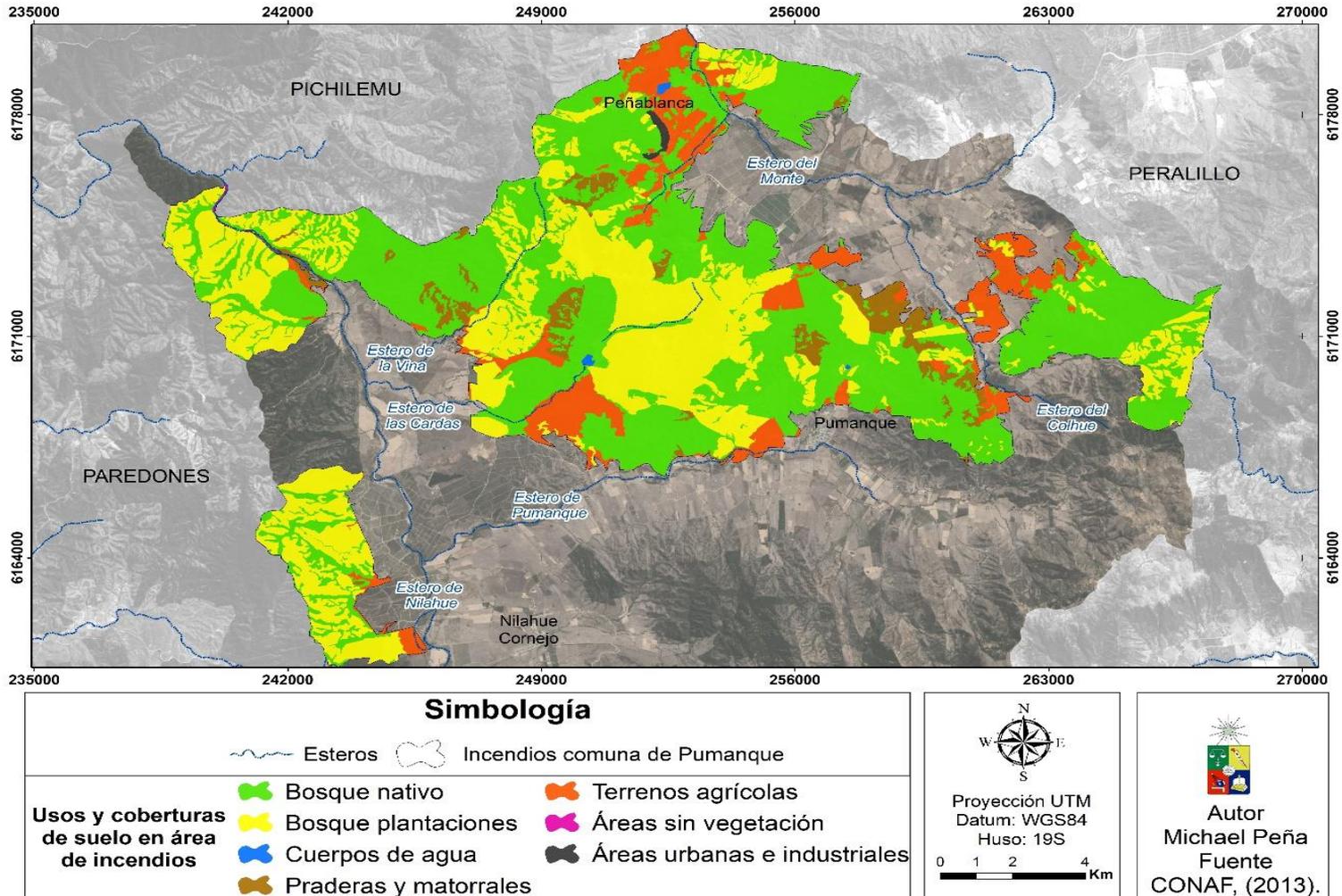
4.2. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN LOS DISTINTOS USOS DE SUELO DE LA COMUNA DE PUMANQUE.

4.2.1. Impactos en los usos y coberturas de suelo comunal.

Gracias al catastro de uso y coberturas de suelo del año 2013, elaborado por la Corporación Nacional Forestal, se logró determinar cuáles fueron aquellos usos en los que se dieron a lugar los incendios forestales. Esto gracias a una intersección de datos elaborados (polígonos de incendios y cálculo de severidad), junto a un procesamiento de datos descargados (usos de suelo).

Al espacializar la totalidad de usos de suelo en el área de estudio, tiene como resultado la siguiente figura, la cual se enfoca en la representación de aquellos usos presentes solamente en el área quemada digitalizada en el objetivo anterior.

Figura 17: Usos y coberturas de suelo en el área quemada en la comuna de Pumanque, región del Lib. Bernardo O'Higgins.



Fuente: Elaboración propia en base a catastro de usos y coberturas de suelo de la CONAF (2013).

Según lo anteriormente expuesto, se tiene que en el área quemada digitalizada de los incendios en la comuna de Pumanque se encuentran 7 tipos de usos y coberturas diferentes, entre los cuales destacan bosque nativo, plantaciones forestales, praderas y matorrales, terrenos agrícolas, áreas urbanas e industriales, cuerpos de agua y espacios sin vegetación. De acuerdo a la cantidad de superficie utilizada por cada uso y cobertura de suelo, (ver Tabla 14), se tiene que en el área existe un predominio por parte de la cobertura correspondiente a bosque nativo con un 51,9% de la superficie del área, seguido por las plantaciones forestales, que ocupan un 32,3%, luego terrenos agrícolas y praderas y matorrales, con un 11,1% y 4,1% respectivamente; mientras que áreas urbanas e industriales, cuerpos de agua y áreas sin vegetación, poseen un 0,3% del total de hectáreas dentro del área de incendio.

Tabla 14: Usos y coberturas de suelo de acuerdo a su cantidad de superficie y sus índices de severidad en el área de incendio.

Uso y cobertura	Superficie en hectáreas total y porcentaje		Índice de severidad en hectáreas				
			No quemado	Leve	Leve a moderado	Moderado a severo	Severo
Bosque nativo	9336,85	51,98%	1830,67	3190,19	2611,93	1493,51	201,65
Bosque plantaciones	5814,53	32,37%	1093,05	1974,8	1512,01	969,6	262,91
Terrenos agrícolas	2009,07	11,18%	901,06	773,83	267,63	68,85	5,23
Praderas y matorrales	742,34	4,13%	207,54	334,57	138,82	60,07	9,28
Áreas urbanas e industriales	36,79	0,20%	25,04	10,67	0,82	0,02	-
Cuerpos de agua	10,67	0,05%	3,49	4,85	2	0,34	-
Áreas sin vegetación	10,41	0,05%	5,92	1,89	0,21	0,01	-
TOTAL	17960,66	100%	4070,97	6290,8	4533,42	2586,4	479,07

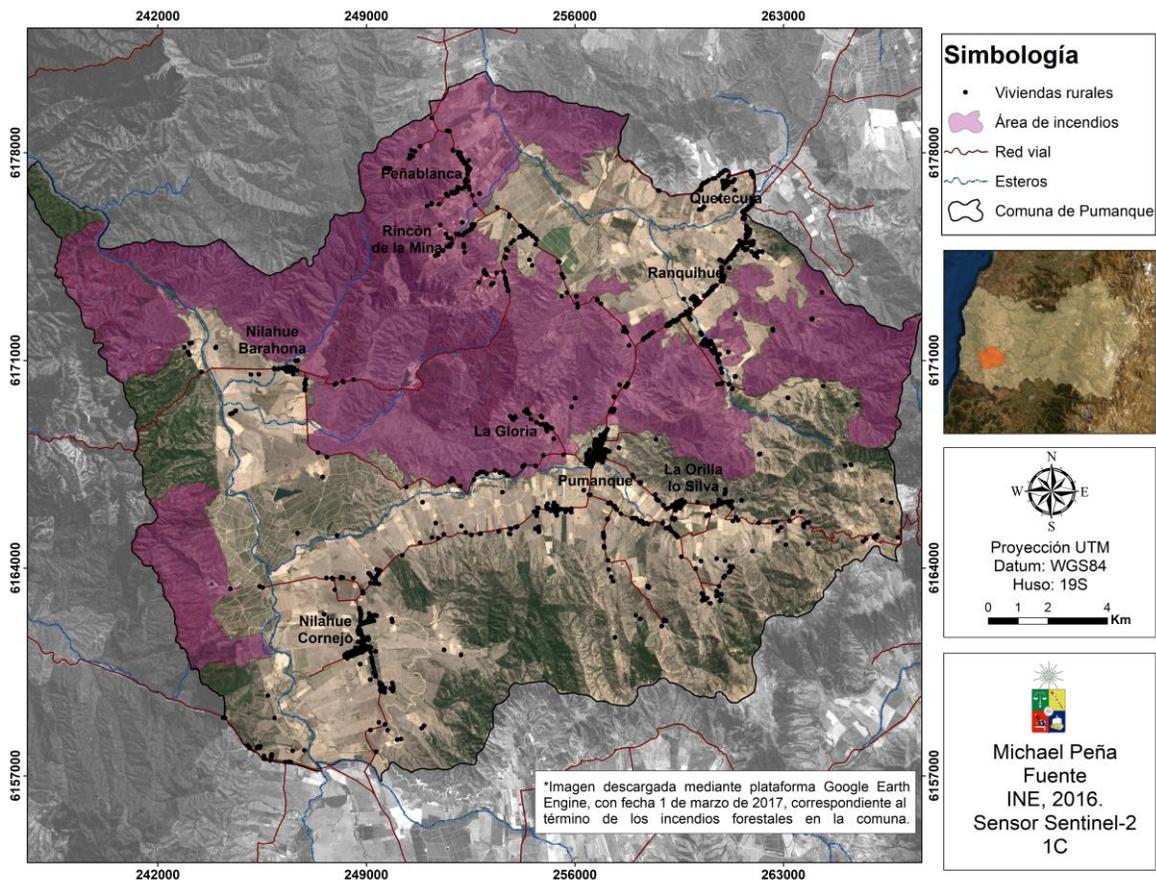
Fuente: Elaboración propia en base a información levantada y datos de la CONAF (2013).

4.2.2. Impactos en las viviendas

En relación al tema de las viviendas rurales presentes en la comuna (ver Figura 18), se tiene que la comuna de Pumanque, cuenta con un total de 1.634 viviendas, repartidas en gran parte del territorio comunal, de las cuales 267 de ellas se ubican dentro del área de incendios durante el período de verano del año 2017, lo que asciende a un 16,3% del total.

Se habla de viviendas rurales, debido a que la comuna de Pumanque, tal como se mencionó en la descripción del área de estudio, con una totalidad de 3.421 habitantes, corresponde en su totalidad a una comuna rural, alcanzando su máximo nivel de población en las aldeas de Nilahue Cornejo y Pumanque.

Figura 18: Ubicación del total de viviendas rurales a nivel comunal al año 2016.



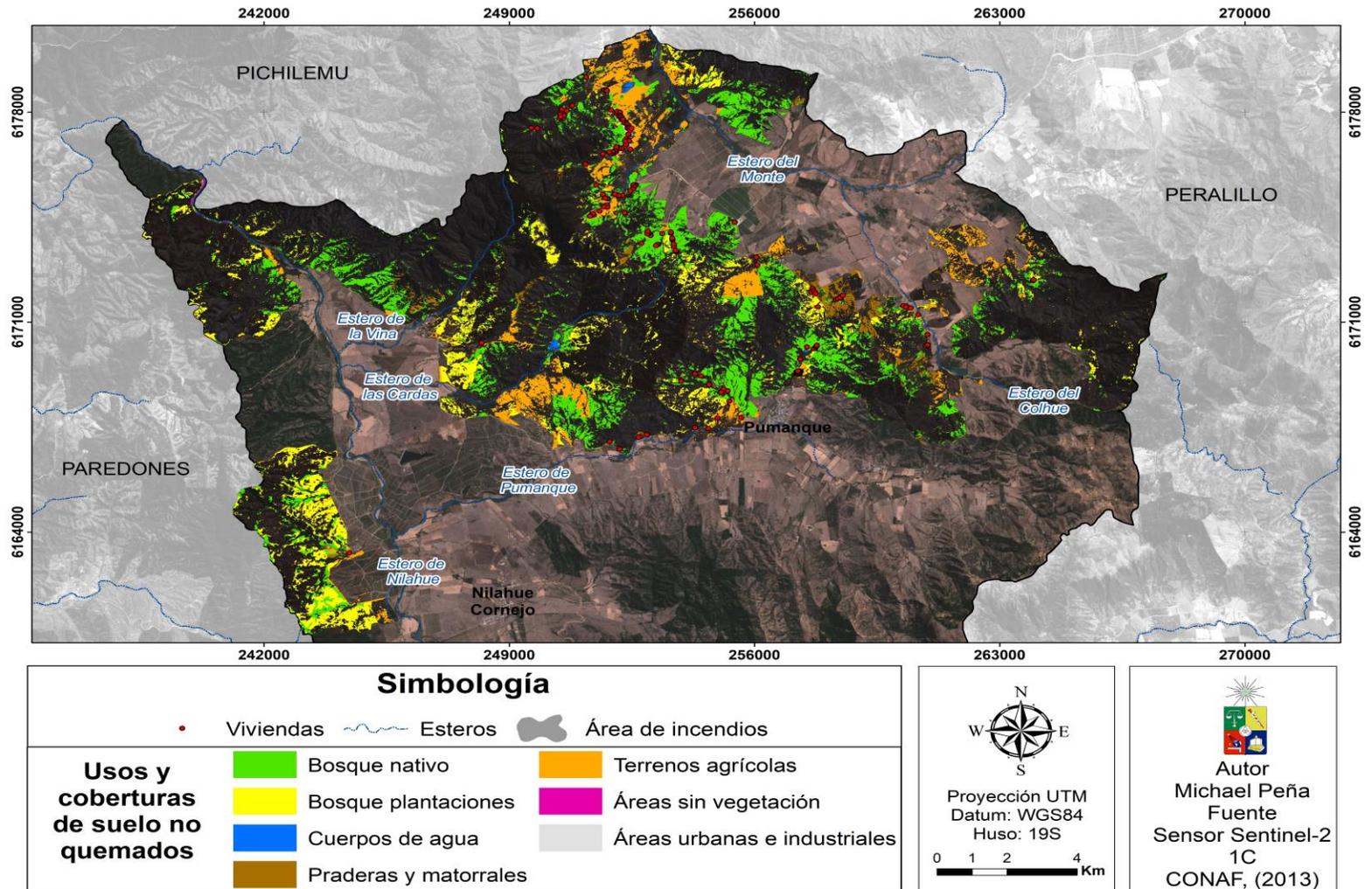
Fuente: Elaboración propia en base a INE (2016).

En cuanto al patrón de asentamiento, se puede apreciar que en gran parte de las viviendas se ubican en los valles agrícolas de la comuna, aledañas tanto a la red vial, como también, los distintos cursos de agua presentes en calidad de esteros. Visualmente, las localidades de Peñablanca, Ranquihue, Quetecura, Nilahue Barahona, Nilahue Cornejo y Pumanque, son los lugares en donde existe mayor cantidad de viviendas. También, hay un número importante de puntos que si bien se encuentran, cercanos a redes viales, se alejan de los focos de población más importantes, incluso algunas se emplazan hacia el interior del área de incendios, tal como se analizará a continuación.

4.2.3. Viviendas y usos no quemados

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la categoría de “no quemado” del índice de severidad de Key (2006), el catastro de uso de suelo de la CONAF (2013), y el catastro de viviendas rurales del INE durante el año 2016, se tienen los siguientes resultados.

Figura 19: Viviendas y usos y coberturas de suelo no quemados en el área de incendio.



Fuente: Elaboración propia.

Espacialmente, los principales espacios que resultaron no quemados, se ubican principalmente hacia los valles, cercanos a terrenos agrícolas y esteros de la comuna. La cantidad de hectáreas de terreno no quemado dentro del área de incendio corresponde a un total de 4.070,97, lo que alcanza un total de un 22,6% (ver Tabla 15), en los cuales bosque nativo, plantaciones forestales y terrenos agrícolas presentan la mayor parte de la superficie, con un total de 3.013,78 hectáreas de terreno. El total de hectáreas presentes en esta categoría asciende a 4.070,97, representando un 9,23% del total comunal.

Tabla 15: Usos y coberturas por categoría “no quemado” en la comuna de Pumanque.

Uso y cobertura de suelo	Superficie (hectáreas)	% de categoría	% superficie total comunal	Viviendas posiblemente afectadas
Bosque nativo	1830.67	44,96%	4,15%	193
Bosque plantaciones	1093.05	26,84%	2,47%	
Terrenos agrícolas	901.06	22,13%	2,04%	
Praderas y matorrales	207.54	5,09%	0,47%	
Áreas urbanas e industriales	25.24	0,61%	0,05%	
Áreas sin vegetación	5.92	0,14%	0,013%	
Cuerpos de agua	3.49	0,08%	0,008%	
Total	4070.97	100%	9,23%	

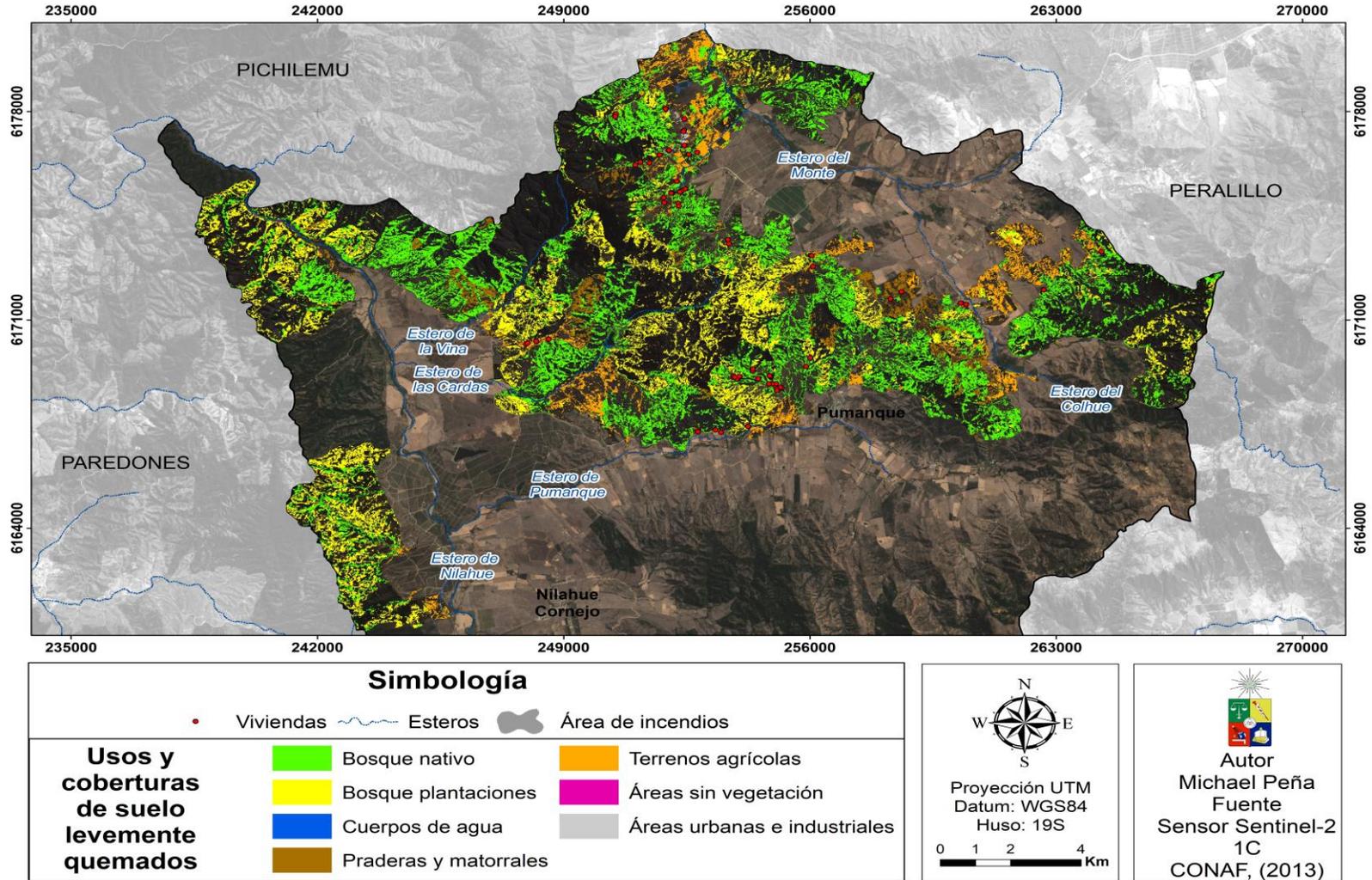
Fuente: Elaboración propia en base a información levantada, índices de severidad de Key (2006), y datos de la CONAF, (2013).

En cuanto a la cantidad de viviendas que se encuentran ubicadas dentro del área de severidad en esta categoría, se tiene que asciende a un total de 193. Esta cantidad corresponde a un 72,2% del total de viviendas presentes en el área de incendios, y un 11,8% del total de viviendas a nivel comunal. Al pertenecer a la categoría de severidad de no quemadas, la totalidad de las viviendas no fueron parte del territorio en donde los incendios del año 2017 se propagaron, por lo tanto según estos resultados, no resultaron dañadas por la acción del fuego.

4.2.4. Viviendas y usos levemente quemados

Para el caso de los usos y coberturas levemente quemados (ver figura 20), se tiene que estos espacios se ubican de forma general, en sectores de mayor altura y pendiente respecto a aquellos que no fueron quemados; por otro lado, en su superficie poseen una mayor cantidad de espacio respecto a la categoría anterior, debido a que con un total de 6.290,8 hectáreas, representan un 35,02% del total del área de incendios.

Figura 20: Usos y coberturas de suelo “levemente quemados” en el área de incendio.



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, entre los usos de mayor extensión en la categoría de severidad leve, (ver Tabla 16), se presentan en primer lugar el bosque nativo, con un 50.7%, seguido de las plantaciones forestales con un 10.99%, seguido de terrenos agrícolas y praderas, con un 4,30% y 1,86% respectivamente; usos que en su forma general, respecto a praderas y terrenos agrícolas, se ubican en sectores de baja pendiente y altitud, cercanos a los valles, mientras que aquellos que hacen referencia a bosque nativo y plantaciones forestales, aumentan su densidad con la altitud.

Tabla 16: Usos y coberturas por categoría “levemente quemado” en la comuna de Pumanque.

Usos y coberturas de suelo	Superficie (hectáreas)	% de categoría	% total comunal	Viviendas posiblemente afectadas
Bosque nativo	3190.19	50,71%	7,23%	67
Bosque plantaciones	1974.8	31,39%	4,47%	
Terrenos agrícolas	773.83	12,30%	1,75%	
Praderas y matorrales	334.57	5,31%	0,75%	
Áreas urbanas e industriales	10.67	0,16%	0,02%	
Cuerpos de agua	4.85	0,07%	0,01%	
Áreas sin vegetación	1.89	0,03%	0,004%	
TOTAL	6290.8	100%	14,27%	

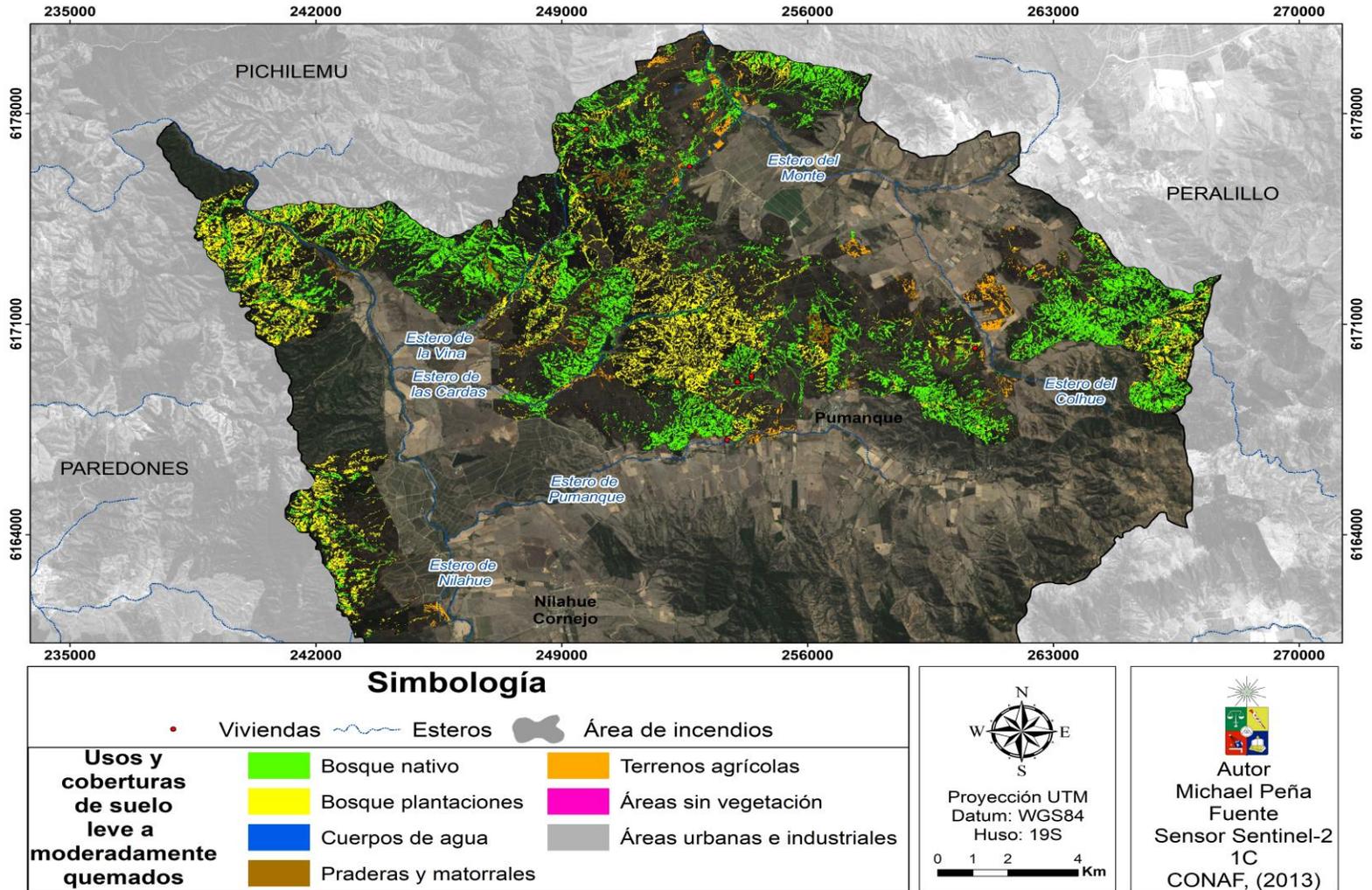
Fuente: Elaboración propia en base a información levantada, índices de severidad de Key (2006), y datos de la CONAF, (2013).

Haciendo referencia a la cantidad de viviendas que se encuentran ubicadas dentro de las áreas que resultaron levemente quemadas, se tiene que en cantidad asciende a 67, lo que corresponde a un 25% de las viviendas presentes en el área total de incendios, y un 4,1% del total de las viviendas a nivel comunal. Viviendas que podrían estar ubicadas en zonas Ember, las cuales consisten en zonas donde las viviendas corren el riesgo de quemarse gracias al movimiento de brasas ocasionados por el viento (Bento-Gonçalves & Vieira, 2019).

4.2.5. Viviendas y usos leve a moderadamente quemados

Los usos y coberturas de suelo en esta categoría de severidad con un total de 4.533,42 hectáreas, correspondiente a un 25,24% del total (ver Figura 21), ya comienzan a incluir aquellos territorios de mayor altitud hacia los cordones de cerros y colinas, dejando atrás gran parte de espacios de menor altitud cercanos a los valles. Por otro lado existen espacios en donde se combinan visualmente puntos de severidad leve con índices de leve a moderadamente quemados, esto debido a que si bien ambos resultaron quemados, existen agrupaciones de puntos que tuvieron diferente índice de severidad en un mismo incendio, esto anterior resultado de distintos factores, como por ejemplo el tipo de vegetación (altura, densidad, especie, etc.), y niveles de humedad que existen en espacios particulares, que inciden de forma directa en la forma de propagación y niveles de severidad que tienen los incendios en un espacio determinado, debido a que las características de incineración difieren de una especie a otra y la conformación de cada una de ellas en el espacio es heterogénea (aunque se presenten de forma natural o antrópica).

Figura 21: Usos y coberturas de suelo “leve a moderadamente quemado” en el área de incendio.



Fuente: Elaboración propia.

Apoyando la cartografía anterior, entre los usos de mayor incidencia en esta categoría de severidad, resaltan bosque nativo con un 14,54%, plantaciones forestales en segundo lugar con un 8,4% y terrenos agrícolas junto a praderas y matorrales con un 1,49% y 0,77% respectivamente

Tabla 17: Usos y coberturas por categoría “leve a moderadamente quemado” en la comuna de Pumanque.

Usos y coberturas de suelo	Superficie (hectáreas)	% de categoría	% total comunal	Viviendas posiblemente afectadas
Bosque nativo	2611,93	57,61%	5,92%	7
Bosque plantaciones	1512,01	33,35%	3,42%	
Terrenos agrícolas	267,63	5,90%	0,60%	
Praderas y matorrales	138,82	3,06%	0,31%	
Cuerpos de agua	2	0,04%	0,004%	
Áreas urbanas e industriales	0,82	0,01%	0,001%	
Áreas desprovistas de vegetación	0,21	0,004%	0,0004%	
TOTAL	4533,42	100%	10,27%	

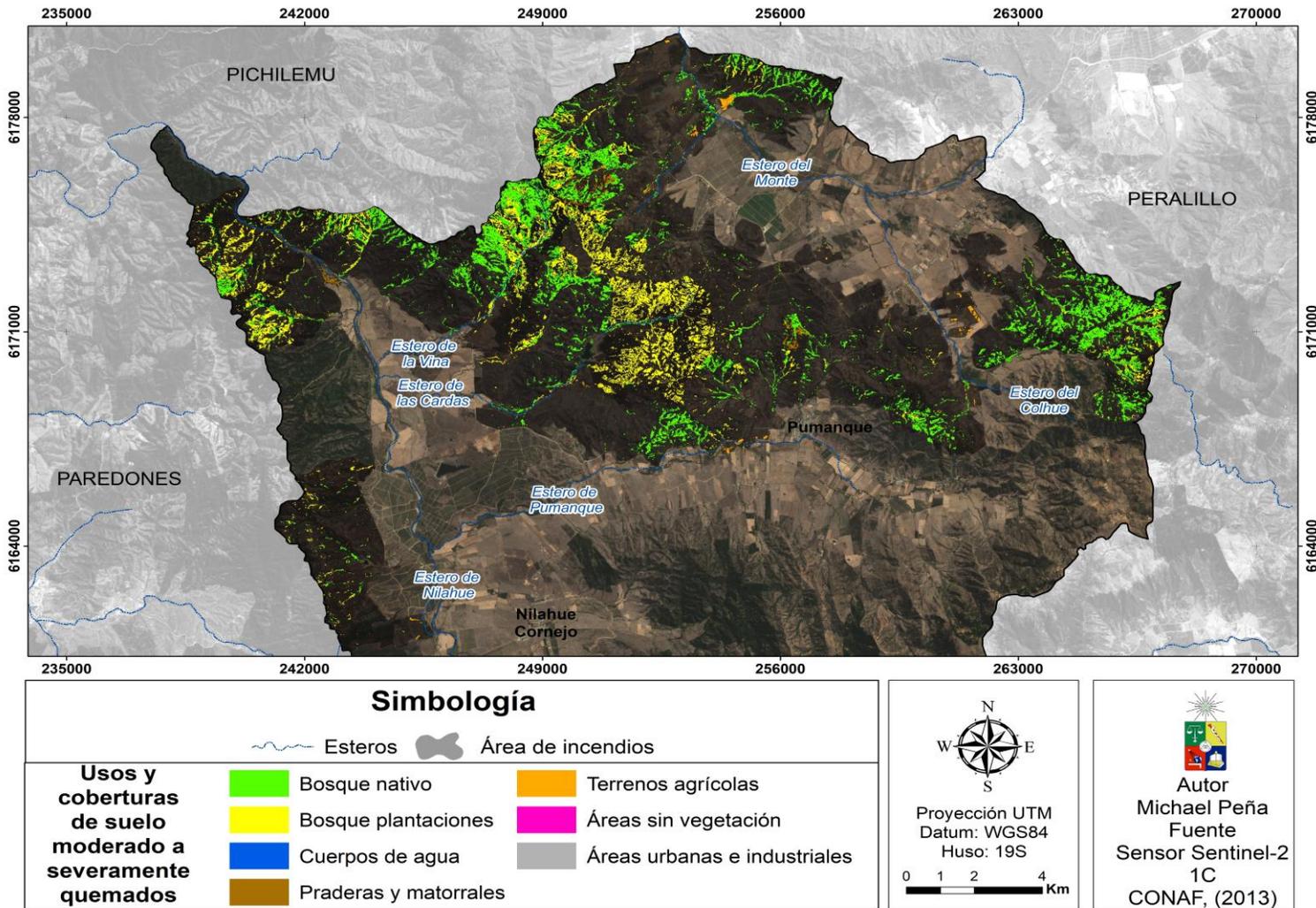
Fuente: Elaboración propia en base a información levantada, índices de severidad de Key (2006), y datos de la CONAF, (2013).

En cuanto a la cantidad de viviendas rurales presentes en los espacios en categoría de leve a moderadamente quemados, se tiene que, con un total de 7 viviendas, asciende a un porcentaje de un 2,6% del total de ellas presentes en el área de incendio y un 0,4% del total de la comuna de Pumanque. Viviendas que podrían estar en zonas Ember.

4.2.6 Viviendas y usos y moderado a severamente quemados

En esta categoría de severidad, en la cual se distinguen aquellas áreas casi de mayor índice de impacto de los incendios forestales en la vegetación y los usos de suelo, de forma general (ver Figura 22), alcanzan las áreas más elevadas en altura y alejadas de aquellos de menor altitud en el polígono de incendios, dejando atrás aquellos espacios cercanos a los terrenos agrícolas ubicados en los valles de la comuna. Esta categoría de severidad cuenta con una superficie de 2.586,4 hectáreas, lo que corresponde a un 14,4% del total del área de incendio.

Figura 22: Usos y coberturas de suelo “moderado a severamente quemados” en el área de incendio.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a cantidad de hectáreas quemadas según usos de suelo, en esta categoría de severidad, se tiene que la categoría de bosque nativo con un 57,7% y plantaciones forestales con un 37,4% son los principales usos afectados, con un total de un 95.1% del total del área en la categoría de moderada a severamente quemada.

Tabla 18: Usos y coberturas por categoría “moderada a severamente quemados” en la comuna de Pumanque.

Usos y coberturas de suelo	Superficie (hectáreas)	% de categoría	% total comunal	Viviendas posiblemente afectadas
Bosque nativo	1493,51	57,74%	3,38%	0
Bosque plantaciones	969,6	37,48%	2,19%	
Terrenos agrícolas	62,85	2,43%	0,14%	
Praderas y matorrales	60,07	2,32%	0,13%	
Cuerpos de agua	0,34	0,01%	0,0007%	
Áreas urbanas e industriales	0,02	0,0007%	0,00004%	
Áreas desprovistas de vegetación	0,01	0,0003%	0,00002%	
TOTAL	2586,4	100%	5,84%	

Fuente: Elaboración propia en base a información levantada, índices de severidad de Key (2006), y datos de la CONAF, (2013).

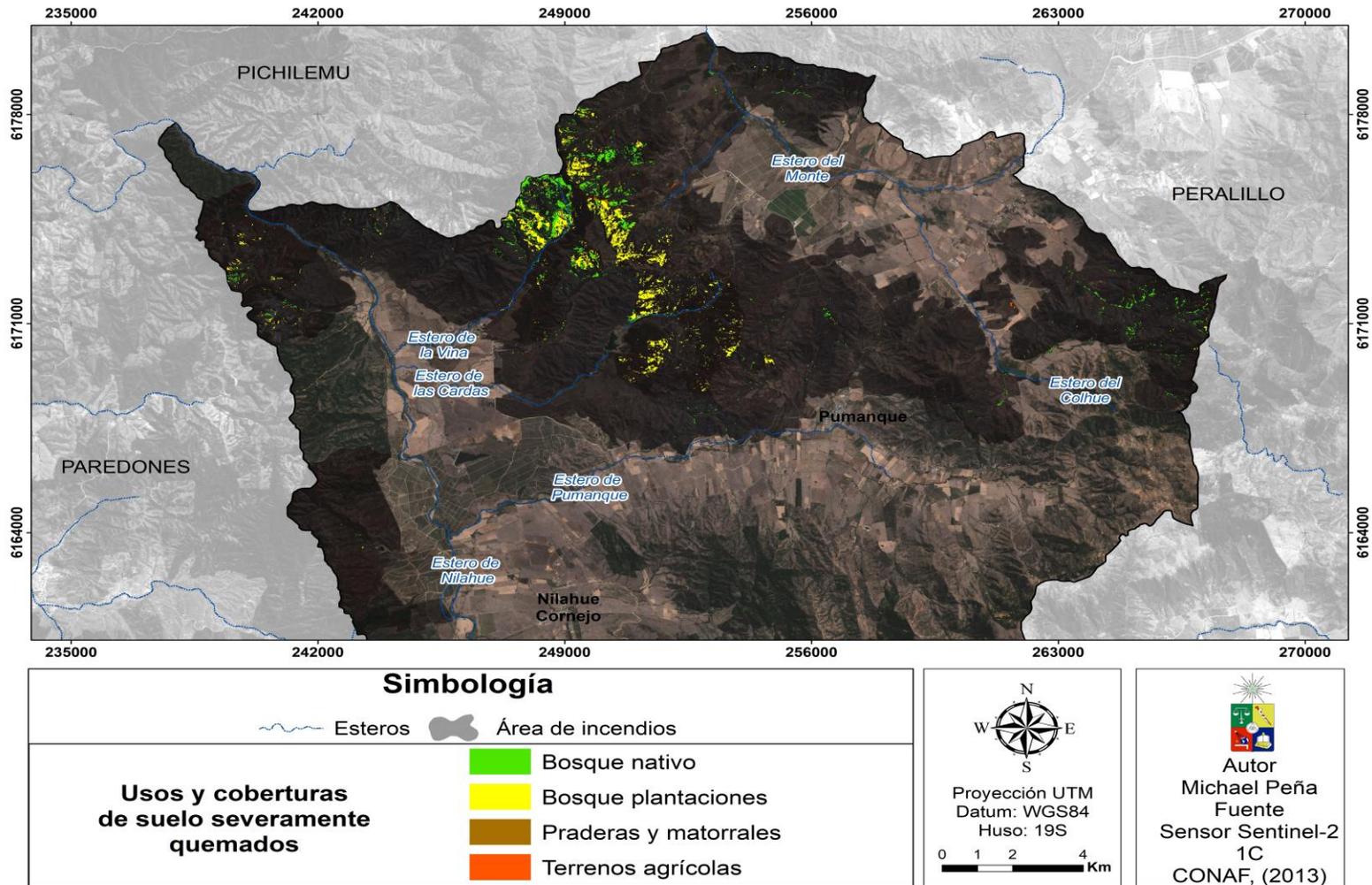
En esta categoría de severidad no se encuentra emplazada ninguna vivienda, posiblemente debido a las condiciones geográficas en la que los incendios se llevaron a cabo, las cuales en su mayoría se pueden presentar como espacios de difícil acceso, alejados de los ejes viales, con la posibilidad de ser terrenos de carácter privados dedicados a en su mayoría al uso de bosques nativos y plantaciones forestales, que representen algún tipo de riesgo o dificulten a la población para ser habitados.

4.2.7 Usos severamente quemados

Esta categoría de severidad se presenta como la de menor espacio utilizado en el área de incendios, pero la de mayor impacto y severidad (ver Figura 23), con un total de 479,07 hectáreas y un 2,66% del área total de incendio.

Espacialmente, se presenta en aquellos lugares de mayor nivel de dificultad de acceso, junto a los más alejados de la actividad antrópica (terrenos agrícolas y asentamientos rurales), reduciéndose a una ubicación en sectores de mayor altitud comunal, entre las caras internas de cordones de cerros y colinas, como también ubicándose de forma general, hacia el centro del área quemada del polígono o incendio de mayor extensión, al borde de las quebradas de los esteros de La Vina y Las Cardas. Por otra parte, hacia los espacios de menor altitud, cercanos a terrenos agrícolas, no existen lugares en donde se presenten rangos severos del impacto de los incendios.

Figura 23: Usos y coberturas de suelo “severamente quemados” en el área de incendio.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la cantidad de hectáreas de cada uso y cobertura de suelo presente en esta categoría, es importante mencionar que, en este caso, plantaciones forestales es la cobertura que presenta mayor índice de severidad, con un total de 262,91 hectáreas, es decir un 54,87% del total de cobertura. En este índice, la categoría de plantaciones forestales, por primera vez, supera en hectáreas a bosque nativo por un 12,87% de superioridad. En segundo lugar, se ubican los bosques nativos, con un 42%, por sobre praderas y terrenos agrícolas, que en su conjunto poseen una superficie total de 14,51 hectáreas, es decir, un 0.08% del total de terreno.

Tabla 19: Usos y coberturas por categoría “severamente quemados” en la comuna de Pumanque.

Usos y coberturas de suelo	Superficie (hectáreas)	% de categoría	% total comunal	Viviendas posiblemente afectadas
Bosque plantaciones	262,91	54,87%	0,59%	0
Bosque nativo	201,65	42,09%	0,45%	
Praderas y matorrales	9,28	1,93	0,02%	
Terrenos agrícolas	5,23	1,09	0,01%	
TOTAL	479,07	100%	1,07%	

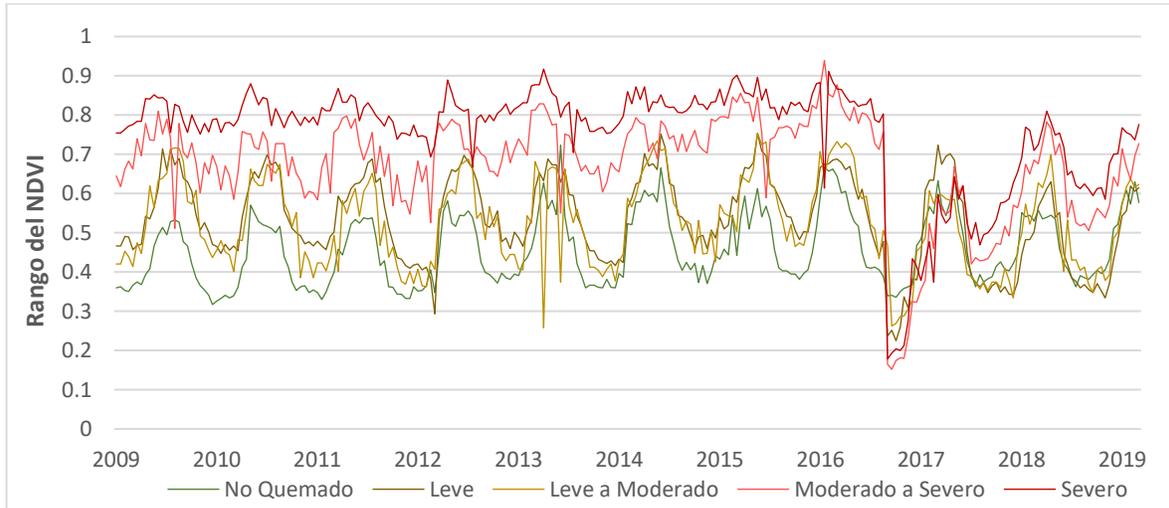
Fuente: Elaboración propia en base a información levantada, índices de severidad de Key (2006), y datos de la CONAF, (2013).

Tal como en la categoría anterior, en este índice de severidad no se encuentran emplazadas viviendas rurales. Algunos motivos posibles son la ubicación general de los espacios severamente quemados, los cuales se ubican hacia los sectores de mayor pendiente y altura de la comuna, los cuales se alejan de la red vial que conecta los principales poblados, como también la naturaleza de estos usos y coberturas de suelo quemados, los cuales se resumen en la presencia tanto de plantaciones de bosques como bosques nativos, que dificulten o no permitan la habitabilidad de la población debido a su naturaleza tanto de emplazamiento geográfico como también social.

4.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VEGETACIÓN QUEMADA, PRE Y POST-INCENDIO, PERÍODO 2009 – 2019.

Al llevar a cabo el procesamiento de datos relacionados al comportamiento de la vegetación mediante la construcción del gráfico de índice NDVI para el período comprendido entre el mes de enero del año 2009 y octubre del 2019, en cada una de las categorías de severidad, se tiene como resultado el siguiente gráfico

Gráfico 4: Comportamiento de la vegetación en las diferentes categorías de severidad durante período 2009-2019.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth Engine.

De forma general, en el período analizado, se observan diferentes patrones en los índices de vegetación en las áreas quemadas de la comuna de Pumanque en cada categoría de severidad, partiendo por la observación de la demostración de los diferentes ciclos anuales de vegetación, los cuales tienen su punto más alto (cerca de 1,0) durante los meses de invierno y primavera, y los más bajos (cerca de 0,0) durante los meses de verano. Con un promedio general de 0,588 en los valores del NDVI. Por otra parte, hasta el año 2017, se observa un patrón constante en los ritmos de vegetación, pero luego de los incendios, el panorama experimenta una transformación, debido a que presenta un descenso abrupto en los índices de NDVI en gran parte de las categorías analizadas, las cuales, hasta la actualidad presentan variados niveles de recuperación de la vegetación quemada. A continuación, se detalla el comportamiento de la vegetación en cada uno de los índices de severidad que tuvieron lugar en el área de estudio durante los últimos 10 años en representados por los polígonos construidos de forma aleatoria.

4.3.1. No quemado

Presenta el patrón más regular de todas las categorías analizadas, debido a que las muestras recolectadas no estuvieron expuestas a la acción del fuego durante el período de incendios forestales. Durante los últimos 10 años, los usos de suelo que formaron parte de las muestras aleatorias no presentaron alteraciones en su composición por efecto de eventos externos a los que las condiciones naturales del entorno les presentan.

Gráfico 5: Comportamiento de NDVI en áreas no quemadas.



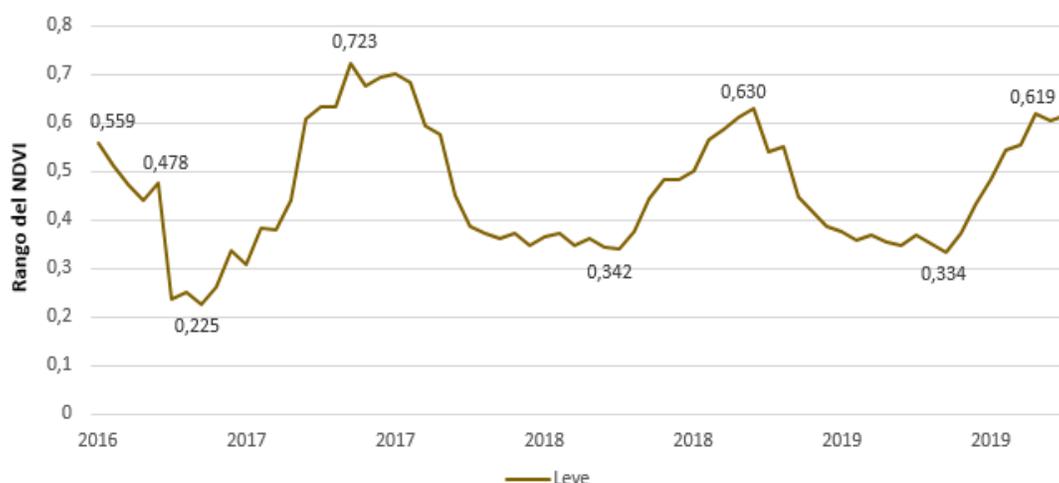
Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth Engine.

Por otro lado, durante el mes de agosto del año 2013, se presentó en esta categoría, con un índice promedio de 0,723 el índice de reflectancia de vegetación más alto de los últimos 10 años; mientras que, el índice vegetacional de menor grado corresponde al mes de enero del año 2010, con un total de 0,317 en el índice de reflectancia.

4.3.2. Levemente quemado

En esta categoría, los polígonos aleatorios presentan en promedio, valores del NDVI mayores en relación a lo que arrojó el índice de severidad de no quemado, debido a que en la mayor parte de las curvas de vegetación de ciclo anual, se ubican en un umbral más cercano a 1,0 respecto a la categoría anterior, con un valor máximo que tuvo lugar en el año 2015 durante el mes de septiembre, el cual alcanzó 0,753. Pero, en el año 2017, en el cual los incendios forestales tuvieron lugar, tuvieron una caída drástica, llegando a valores reflectancias de un mínimo de 0,225 (tomando en cuenta que el valor de NDVI promedio para los 10 años analizados es de 0,534). Los incendios forestales tuvieron un impacto negativo directo en los índices de vegetación en esta categoría, descendiendo en valores de reflectancia desde 0,559 en noviembre de 2016, a 0,225 durante el mes de febrero, mes en el cual, los incendios forestales cesaron.

Gráfico 6: Comportamiento de NDVI en áreas levemente quemadas.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth Engine.

Para el período post-incendio, en cuanto a la recuperación de la vegetación, en esta categoría, fue rápida debido a que, a finales de mayo del año 2017, el índice vegetacional expresaba datos de reflectancia superiores a 0,608, el cual corresponde a un dato de NDVI superior al promedio de datos total de la década analizada, que alcanza 0,534 dentro del rango. Hasta la actualidad, el índice vegetacional en esta categoría, mantiene los patrones de vegetación anuales observados en el período pre-incendio 2017.

4.3.3. Leve a moderadamente quemado

En relación a los resultados que otorgaron las muestras aleatorias, los valores de reflectancia presentan en promedio, valores similares a los obtenidos en la categoría anterior, debido a que, en primer lugar, los ciclos anuales de vegetación se presentan de forma similar, llegando a un valor máximo de reflectancia de 0,754 durante el mes de septiembre del año 2015, y un promedio a nivel de década de 0,523. Durante el período de incendio del año 2017, se experimentó una caída importante en el índice NDVI, debido a que, durante el mes de noviembre del año 2016, se presentaban valores de reflectancia de 0,521; pero al mes de febrero de 2017, los mismos valores descendieron a un total de 0,262 que fue producto de la acción del fuego en esta categoría de severidad.

Gráfico 7: Comportamiento de NDVI en áreas leve a moderadamente quemadas.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth Engine.

Sin embargo, el valor mínimo de NDVI para esta categoría de severidad en la presente década, tuvo lugar en el mes de junio del año 2013, el cual alcanzó un índice 0,258, el cual tuvo un descenso abrupto respecto a mayo de 2013, el cual el índice vegetacional alcanzaba rangos de 0,652. Esta caída abrupta se puede explicar tanto por algún proceso de deforestación en el área, algún incendio forestal ocurrido en los polígonos de muestra, u otro fenómeno determinado, pero de duración breve, debido a que, para el mes de julio del mismo año, los valores de vegetación, ya habían experimentado una recuperación, presentando un índice NDVI promedio de 0,660.

En cuanto al período post-incendio, hasta la actualidad, en esta categoría, existió una recuperación más lenta de la vegetación, respecto a la categoría anterior, pero hacia el año 2018 y 2019 hasta la actualidad, el índice NDVI ya se encuentra dentro de los valores promedios de la década analizada cercanos a 0,523 de reflectancia.

4.3.4. Moderado a severamente quemado

En esta categoría, los resultados de las muestras aleatorias ya presentan una diferencia significativa respecto a las categorías anteriores. Si bien, se respeta el patrón general de vegetación anual, que hace referencia a menor vegetación en verano, en relación al aumento durante invierno y primavera, los valores otorgados al medir la vegetación en promedio alcanzan valores de 0,673 en la reflectancia durante la década analizada, superior al promedio del índice vegetacional de las categorías anteriores, que tuvieron un valor promedio inferior a 0,534 en el NDVI. En esta categoría, el máximo nivel del NDVI en la

década, tuvo lugar durante el mes de mayo del año 2016, con rangos que alcanzaron los 0,939 (el cual corresponde al valor máximo entre los 1230 datos totales, que involucra los datos obtenidos de todas las categorías).

Durante el período de incendios del año 2017, en esta categoría se presentó el valor mínimo de reflectancia entre los 1230 datos totales, arrojando un índice del NDVI de 0,152. Este total, tuvo lugar en una caída abrupta del índice vegetacional en relación al comienzo del período de incendios, ya que, en noviembre del año 2016, se alcanzó un total de 0,802 en la reflectancia, mientras que, en el mes de febrero, alcanzó su nivel mínimo de 0,152 en el rango del NDVI, provocado por el comportamiento de los incendios forestales que impactaron de gran manera la vegetación en la superficie terrestre.

Gráfico 8: Comportamiento de NDVI en áreas moderada a severamente quemadas.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth Engine.

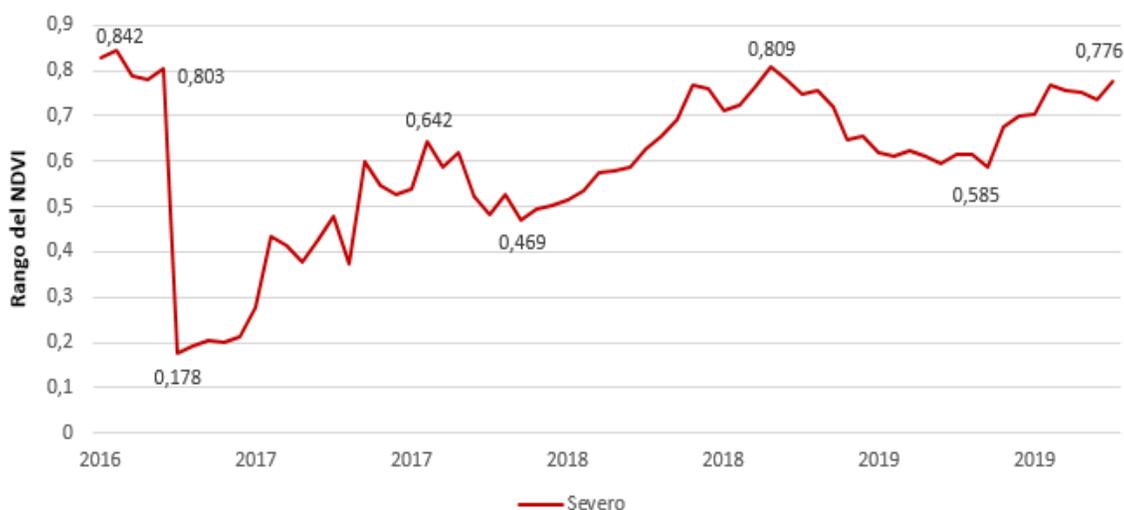
Al hacer referencia al período post-incendio, se tiene que la curva espectral de NDVI demuestra una recuperación moderada en relación a categorías de severidad anteriores, en relación al máximo índice registrado (0,939), alcanzando un máximo en el año 2017 en el mes de noviembre de 0,620 en el índice NDVI. Durante el mes de septiembre del año 2018, los datos de reflectancia superan los valores de vegetación promedio de la década en esta categoría (0,783), y recuperan en gran medida su patrón general de comportamiento vegetacional, esto podría ser explicado básicamente por la naturaleza de la vegetación existente en el área.

4.3.5. Severamente quemado

En el índice NDVI de la categoría severa se presenta un patrón anual diferente al de otras categorías, debido a que, en los meses de verano y otoño, en donde categorías anteriores existía una clara disminución de vegetación, en esta ocasión ocurre que esta merma se presenta, pero en menor medida, incluso hasta comienzos del año 2017, los promedios

mínimos de vegetación durante los meses de verano, se ubican entre los 0,700 y 0,800, valores que son mayores incluso a la gran mayoría de los datos. Incluso, en esta categoría se encuentra el promedio más alto de todos los índices de severidad analizados anteriormente, debido a que alcanza un total de 0,753 de reflectancia promedio. En cuanto al valor mínimo de reflectancia promedio, este tuvo lugar durante el período de incendios del año 2017, ya que en el mes de febrero, el índice NDVI alcanzó un mínimo de 0,178 (el cual corresponde al segundo índice más bajo entre todas las categorías analizadas), que tuvo lugar tras una caída abrupta desde el mes de noviembre del año 2016, debido a que durante ese mes, el valor de NDVI rondaba los 0,827 en la reflectancia espectral promedio, el cual denota las dimensiones del impacto de los incendios forestales en los polígonos aleatorios analizados.

Gráfico 9: Comportamiento de NDVI en áreas severamente quemadas.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth Engine.

En cuanto al período post-incendio, en relación al comportamiento de la vegetación, esta presenta una recuperación rápida durante el transcurso del año 2017 en relación al total de categorías anteriores, debido a que, durante este período, tras los incendios forestales, el máximo índice de NDVI presentado en la base de datos corresponde a 0,640 y tuvo lugar durante el mes de septiembre. Hacia el año 2018 y 2019, es la categoría que mayor recuperación presenta, incluso, con máximos de reflectancia de vegetación de 0,809 en septiembre de 2018 y 0,776 durante el mes de agosto de 2019. Una recuperación rápida en relación al hecho que esta categoría fue la que más daño recibió, en la cual, influye de gran manera el tipo de vegetación presente en las áreas analizadas a nivel post-incendio.

CAPÍTULO 5: LIMITANTES DEL MODELO, REFLEXIONES Y DISCUSIONES.

5.1. LIMITANTES DEL MODELO

A través del desarrollo de este documento, y los diferentes procesos llevados a cabo para obtener los diferentes resultados de la investigación, se tuvieron una serie de limitantes, que provocaron una serie de dificultades a la hora de obtener los datos más cercanos a la realidad posible, las cuales se enumerarán a continuación.

En relación a la base de datos de usos y coberturas de suelo elaborada por la Corporación Nacional Forestal del año 2013. Esta información no cuenta con una actualización que haga referencia a la conformación de los usos y coberturas de suelo al día de hoy, como también no se presenta elaborada con un nivel de detalle lo suficientemente apto para trabajarlo a una escala tan baja como la que se utilizó en esta investigación, la cual corresponde a 10 metros por pixel. En algunos territorios, no concuerdan algunos usos y coberturas de suelos con las reflectancias absorbidas por el sensor Sentinel-2 nivel 1C. Un ejemplo de esto anterior (ver Figura 24), hace referencia a que en el uso de cuerpos de agua, arrojó valores de severidad de incendios forestales, lo cual no debería ocurrir debido a la presencia de agua. Al revisar la información, se observó que, en primer lugar, el cuerpo de agua no estaba digitalizado de forma correcta, incluso, no se encontraba completamente cubierto, y, por otro lado, no se respetaban algunos bordes. Esto anterior se puede explicar por varias razones, la primera hace referencia a que al año 2013 el cuerpo de agua ocupaba tanto menor espacio como una forma diferente de emplazamiento, que evolucionó hasta hoy en día, y debido a esto, se digitalizó más pequeño que lo que corresponde (debido a que la imagen con la cual se trabajó corresponde a una tomada durante 2017); otra forma de explicación, es que cuando se realizó el catastro de usos y coberturas de suelo, se trabajó en un nivel de escala mayor, con imágenes de menor resolución espacial, lo que provoca que se perdieran niveles de detalles importantes. De todas maneras, para este trabajo en cuestión, la resolución y niveles de detalles de los usos de suelo, se comportó como una limitante, para el cálculo real del impacto de los incendios en la comuna de Pumanque.

Figura 24: Error en delimitación de cuerpos de agua.



Fuente: Elaboración propia.

Otra de las limitantes que se encontró a lo largo de esta investigación, hace referencia a la calidad de información de vivienda facilitada por el INE. Si bien, se contó con la cantidad total tanto de viviendas presentes a nivel comunal (con su respectiva ubicación espacial), como también, gracias a los procesos llevados a cabo, la cantidad de viviendas posiblemente afectadas por el período de incendios; hubiera sido interesante contar con una información que haga referencia a la materialidad de cada una de las viviendas junto a la cantidad de personas habitadas por cada una de ellas. Esto hubiera contribuido a elaborar y calcular un nivel de impacto con un mayor índice de detalle, ya que con la información que se facilitó sólo fue posible calcular la cantidad de viviendas posiblemente afectadas por niveles de severidad, pero al contar con la información faltante, se podría haber llegado a reconocer cuales fueron las viviendas más vulnerables según su materialidad, como también, reconocer la cantidad total de población que pudo haber sido afectada y evacuada debido a la acción del fuego. Esta información no está disponible para uso público, debido a que es confidencial. Si bien, se llegó a una estimación de datos de viviendas afectadas, la falta de detalle de esta, se conformó como una limitante en el cálculo de la evaluación del impacto de los incendios forestales en la comuna de Pumanque durante el año 2017.

Para terminar, a nivel general, el trabajo llevado a cabo arroja resultados coherentes entre sí, a pesar de las limitantes. Se espera que en el futuro se mejore el nivel de calidad del detalle de la información disponible, tanto en la resolución espacial, como también, se trabaje en el nivel de detalle de diferentes tipos de catastros de información, de manera tal, que, al ser utilizados, contribuyan de buena forma en la elaboración y procesamiento de datos en investigaciones como la que se llevó a cabo en este documento.

5.2. REFLEXIONES FINALES

En cuanto a la espacialización de los incendios forestales durante el verano de 2017 en la comuna de Pumanque, se tiene que, en su forma general, se presentan en aquellos espacios de mayor pendiente y altura y se alejan progresivamente de los valles agrícolas principales, principalmente hacia el centro-norte de la comuna. En cuanto a las áreas que se encuentran en el área general de los incendios, la superficie asciende a un total de 17.960,66 hectáreas, el cual corresponde a un 40,8% del total comunal (44.100 hectáreas).

En cuanto a los índices de severidad calculados, se tiene que la categoría de más superficie utilizada corresponden a los índices de severidad leve y leve a moderado, las cuales poseen el 60,32% del área total de incendio y un 24,6% del área total comunal; por el contrario, las categorías calculadas de menor superficie, corresponden a las severidades de moderado a severo y severo, las cuales en conjunto poseen un total de 16,94% de los incendios totales comunales y un 6,9% de la superficie total comunal.

En cuanto a los usos de suelo más afectados durante el período de incendios, se tiene que el uso y cobertura de suelo correspondiente a bosque nativo (9.335,85 hectáreas) y plantaciones forestales (5.814,53 hectáreas), ocupan la mayor cantidad de superficie del área total de los incendios, por sobre otros usos y coberturas presentes en el área de estudio, como terrenos agrícolas, praderas y matorrales, áreas urbanas e industriales, cuerpos de agua y áreas sin vegetación. Este patrón se mantiene en las 5 categorías de severidad, es decir, los usos de bosque nativo y plantaciones forestales se repiten en todos los índices de severidad como los usos de suelo de mayor afectación, pero en la categoría de severidad mayor, correspondiente a “severo”, las plantaciones forestales son las que predominan en cuanto a hectáreas utilizadas, siendo en la única categoría en donde logra superar en superficie a bosque nativo.

Esto anteriormente mencionado puede ser explicado por medio de la naturaleza propia de las plantaciones forestales, las cuales, tal y como se explicaron en el marco teórico de esta investigación, es que tanto Pinos, como Eucaliptus y Aromos a lo largo del tiempo han evolucionado en ambientes en donde incendios son parte natural de los ecosistemas, por lo cual estas especies incorporaron al fuego como parte de sus mecanismos de regeneración, contienen aceites y alcoholes inflamables y por consiguiente, aumentan tanto la incidencia como la severidad y propagación de incendios (Salinas, 2019). Es por lo anteriormente mencionado que existe la posibilidad que en aquellos espacios donde ocurran incendios forestales, las plantaciones forestales afectadas tendrán un índice de severidad mayor en comparación a otras categorías, debido a la naturaleza de sus características físicas.

Con respecto a esto anteriormente mencionado, y relacionado al proyecto de ley que se presentará en la COP25 en Madrid durante el 2019, se tiene que se planea reforestar gran parte del territorio nacional para así, lograr ser un país carbono neutral, es decir, absorber la misma cantidad de emisiones que se emiten a la atmosfera. Es por esta razón que se planea aumentar las plantaciones a gran escala de diferentes tipos de bosques, ya sea nativo, urbano, forestal, entre otros. Respecto a esto, haciendo referencia al aumento de las plantaciones forestales para lograr ser un país carbono neutral hacia el año 2050, se

puede concluir según los índices de severidad, que si bien se puede lograr ser un país carbono neutral a largo plazo, pero también podría dar espacio a la conformación de incendios forestales cada vez más severos dentro del territorio, debido al aumento sostenido tanto de incendios en esos usos de suelo, como también el avance de la desertificación y aumento de temperaturas, que podrían establecer condiciones naturales cada vez más aptas para la conformación y propagación de incendios forestales; por otra parte, el aumento de las plantaciones forestales, según sus condiciones naturales y biológicas, pueden provocar una pérdida de biodiversidad en el territorio, como también una susceptibilidad al aumento de diferentes plagas (Salinas, 2019).

En cuanto al comportamiento de la vegetación según los gráficos de NDVI arrojados por Google Earth Engine, pre y post-incendios forestales de verano de 2017, se tiene que, de forma general, existe una rápida recuperación de la vegetación hasta el día de hoy, a pesar del índice de pérdida de estas gracias a la acción de los incendios. En cuanto al análisis de NDVI en los espacios en donde los índices de severidades fueron más altos, se tiene que en estos sitios predominan los usos de suelo de bosques nativos y plantaciones forestales en la categoría de moderado a severo, y plantaciones forestales en los usos severamente quemados, es en este sentido que este último uso y cobertura de suelo, presenta valores más alto del NDVI a lo largo de los últimos 10 años, incluso con un menor descenso en sus valores durante los períodos de verano, en donde la mayoría de las categorías presenta una disminución con un mayor índice de pérdida de vegetación. Las plantaciones forestales presentan un mayor índice vegetacional a lo largo de los últimos 10 años, una menor disminución, pero a su vez, una mayor pérdida de vegetación durante el período de incendios, lo que podría conllevar a que la recuperación de esta vegetación sea más lenta, pero ocurrió todo lo contrario, la recuperación fue rápida, incluso, hacia el presente período de tiempo, el índice vegetacional se encuentra dentro de los valores normales promedios de los últimos 10 años, esto debido a que se encuentran constantemente en producción y están sujetas a ciclos cortos de rotación, por lo cual su tiempo de producción y crecimiento es menor, por consiguiente su recuperación también lo es (Salinas, 2019).

5.3. CONCLUSIONES

La ocurrencia de incendios forestales está fuertemente vinculada con el cambio climático y la actividad antrópica, al igual que los impactos que estos puedan tener en un territorio determinado, los cuales pueden ser mayores o menores según las características geográficas específicas que posea un territorio, tanto en dimensiones geográficas físicas, como las condiciones sociales en las que estos estén inmersos. Entender de forma holística el comportamiento, la evolución, y las dimensiones de los impactos de los incendios forestales en un territorio determinado, permite comprender y planificar y gestionar el comportamiento de estos fenómenos hacia el futuro.

La realización de trabajos de investigación de esta naturaleza de forma constante contribuyen de forma directa al análisis del comportamiento de los incendios forestales a través del tiempo, aumentando las posibilidades de mejora de los modelos de trabajo y procesamiento de información, debido a que si bien la tecnología de los sensores remotos está en constante desarrollo para lograr mejoras en la recolección de información de la superficie terrestre, relacionadas a la resolución espacial como temporal; también se pueden ir mejorando las técnicas de procesamiento de información, en las cuales se puede trabajar en la calidad de la información disponible, la que se puede ir mejorando constantemente, disminuyendo así, margen de error en los resultados, como también contribuir de esta forma a la disminución de las limitaciones en el procesamiento de datos y cálculo de resultados.

Ciertos organismos públicos deberían ser más rigurosos en la calidad de la información que ofrecen al público en general, debido a que muchos de estos datos se encuentran desactualizados o no elaborados con un nivel de prolijidad al nivel de organismos estatales, lo que puede llevar a conformarse a la hora de hacer uso de esta información en diferentes trabajos de investigación ya sea académica o de otra índole, a conformarse trabajos cuyos resultados no son lo suficientemente confiables, debido a la baja calidad de la información que se usa como insumo. Por lo cual, la actualización de datos con un mayor nivel de detalle y prolijidad se hace urgente para este tipo de trabajos de investigación geográfica, sobre todo si se hace referencia a investigaciones sobre incendios forestales, el cual es un tema latente dentro del territorio nacional, en el que la actividad forestal de producción cada vez va en mayor aumento y por consiguiente, según antecedentes y resultados del proceso expuestos en este documento, también el aumento y severidad de incendios forestales.

La Geografía como disciplina en este tipo de trabajos de investigación se hace fundamental, debido a que permite el trabajo y análisis de las nuevas condiciones que se están presentando en el territorio nacional, involucrando tanto, dimensiones geográficas físicas, naturales del territorio, sin abandonar la importancia de la incorporación de la dimensión social en el cálculo de los impactos. La Geografía permite un análisis holístico multidimensional, que hacen posible un pensamiento crítico sobre la evolución de los territorios, lo cual ayuda a la predicción de posibles escenarios futuros, y junto a esto, la elaboración de planes para disminuir niveles de riesgo y exposición a eventos adversos.

Es trascendental que exista un conocimiento de la población acerca de los espacios que lo rodean, para lo cual un reforzamiento de la educación ambiental se hace esencial, sobre

todo haciendo referencia a comprensión de las nuevas características de los territorios en que una población se desarrolla, y permitir que esta misma población, se haga parte en la toma de decisiones respecto a temas ambientales, fortaleciendo la visión crítica de estas, y trabajar en la visión de futuro de los territorios habitables, resguardando aquellos espacios naturales que se tornan como fundamentales para el buen desarrollo de la vida en el planeta, como lo son el resguardo de los bosques nativos, y su importancia en la vida tanto humana, como su aporte a la biodiversidad natural.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, D. (2019, mayo 15). Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel. *MappingGIS*. <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>
- Arellano, A. (2017, febrero 1). *Mega incendios: El historial de omisiones de las autoridades que abonó la tragedia – CIPER Chile*. <https://ciperchile.cl/2017/02/01/mega-incendios-el-historial-de-omisiones-de-las-autoridades-que-abono-la-tragedia/>
- Badía, D., & Martí, C. (2003). Plant Ash and Heat Intensity Effects on Chemical and Physical Properties of Two Contrasting Soils. *Arid Land Research and Management*, 17(1), 23-41. <https://doi.org/10.1080/15324980301595>
- Bento-Gonçalves, A., & Vieira, A. (2019). Wildfires in the wildland-urban interface: Key concepts and evaluation methodologies. *Science of The Total Environment*, 135592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135592>
- Bianchini, G., Camia, A., Chuvieco, E., Koutsias, N., Margaleff, T., & Martínez, J. (2005). *Using Remote Sensing and GIS for Global Assessment of Fire Danger*. <https://pdfs.semanticscholar.org/4949/50176516fbf7c4a29f126bb189fbaaba82a8.pdf>
- Bodí, M. B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Pereira, P., & Úbeda, X. (2010). *LIBRO INCENDIOS II* pags 349-436. II, 55.
- Bolaños-González, M. A., Ibarra-Hernández, F., Medrano-Ruedaflores, E., Palacios-Sánchez, L. A., Pascual-Ramírez, F., & Paz-Pellat, F. (2011). Desarrollo de curvas espectrales del crecimiento anual de la vegetación, usando sensores remotos. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 2(4), 445-464.
- Caballero, I., Caldeira, R., Navarro, G., Silva, G., Parra, P.-C., & Vázquez, Á. (2017). Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of*

Applied Earth Observation and Geoinformation, 58, 97-106.

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.003>

Cancer, L., Echeverría, M., Ibarra, P., Pérez, F., & Riva, J. (2000). El papel de la vegetación quemada y del proceso de regeneración vegetal en relación con la pérdida de suelo. El caso del incendio de Agüero (Prepirineo oscense, España). *Il Suolo. Bollettino dell'Associazione Italiana Pedologi*, 3, 24-30.

Carmona, A., González, M. E., Nahuelhual, L., & Silva, J. (2012). Spatio-temporal effects of human drivers on fire danger in Mediterranean Chile. *Bosque (Valdivia)*, 33(3), 31-32.

<https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000300016>

Casella, A., Delegido, J., Jimenez, J. C., Moreno, J., Pezzola, A., Urrego, E. P., Sobrino, J. A., Soria, G., & Winschel, C. (2018). Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-8. *Revista de Teledetección*, 51, 47. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8934>

Castillo. (2013). *INTEGRACIÓN DE VARIABLES Y CRITERIOS TERRITORIALES COMO APOYO A LA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS FORESTALES. ÁREA PILOTO: VALPARAÍSO - CHILE CENTRAL*. <http://linfor.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2014/08/ID-40-2013-VARIABLES-y-CRITERIOS-TERRITORIALES.pdf>

Castillo, M., Pedernera, P., & Peña, E. (2003). *Incendios forestales y medio ambiente: Una síntesis global*. VOL. XIX(n° 3), 10.

Cerdà, A., & Doerr, S. H. (2005). Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: An 11-year investigation. *International Journal of Wildland Fire - INT J WILDLAND FIRE*, 14. <https://doi.org/10.1071/WF05044>

- Cerdà, A., & Doerr, S. H. (2008). The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *CATENA*, 74(3), 256-263.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.010>
- Chuvienco, E. (2009). DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE INCENDIOS FORESTALES DESDE SATÉLITES DE TELEDETECCIÓN. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 103(1), 173-181.
- Comisión del futuro, ciencia, tecnología e innovación. (2019). *Chile, Potencia Mundial Forestal Siglo XXI*.
https://www.senado.cl/appsenado/index.php?mo=tramitacion&ac=getDocto&iddocto=6000&tipodoc=docto_comision
- CONAF. (s. f.). *Incendios forestales en Chile*. Recuperado 31 de julio de 2019, de <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/>
- CONAMA. (2006). *ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE CHILE PARA EL SIGLO XXI*.
http://dgp.uchile.cl/PRECIS/articles-39442_pdf_Estudio_texto.pdf
- Corporación Nacional Forestal. (s. f.-a). *1510588722PPCIFTalca.pdf*. Recuperado 2 de septiembre de 2019, de http://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1510588722PPCIFTalca.pdf
- Corporación Nacional Forestal. (s. f.-b). *CONAF*. Recuperado 2 de septiembre de 2019, de <http://www.conaf.cl/quienes-somos/>
- CR2. (2015). *Informe-megasequia-cr21.pdf*. <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>
- Datos Climáticos Mundiales. (s. f.). *Clima Pumanque: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Pumanque*. *Climate-Data.org*. Recuperado 31 de julio de 2019, de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/chile/vi-region-del-libertador-bernardo-o-higgins/pumanque-150071/>
- de Groot, W. J., & Flannigan, M. D. (s. f.). *El Cambio Climático y los Incendios Forestales*. 12.

- Díaz, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227-240.
<https://doi.org/10.22206/cys.2012.v37i2.pp227-240>
- Díaz-Hormazábal, I., & González, M. E. (2016). Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 147-158.
<https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100014>
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Blake, W. H., Chafer, C. J., Humphreys, G. S., & Wallbrink, P. J. (2006). Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology*, 319(1), 295-311.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.038>
- Echeverria, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J. M., Lara, A., & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests. *Biological Conservation*, 130(4), 481-494. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.017>
- El Desconcierto. (2017). *FOTOS | Incendio en Pumanque arrasa con más de 25 mil hectáreas*.
<https://www.facebook.com/eldesconciertocl/>.
<https://www.eldesconcierto.cl/2017/01/19/fotos-incendio-en-pumanque-arrasa-con-mas-de-15-mil-hectareas/>
- EOS. (s. f.). *¿Qué es el NDVI? Haga clic aquí para ver sus características y su fórmula*. EARTH OBSERVING SYSTEM. Recuperado 7 de agosto de 2019, de <https://eos.com/ndvi/es/>
- ESA. (2017). *Facts and figures*. European Space Agency.
http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Facts_and_figures
- FAO. (2006). *Fire management Global assessment 2006*. <http://www.fao.org/3/a-a0969e.pdf>
- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., & Quintano, C. (2016). SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International Journal of Applied*

- Earth Observation and Geoinformation*, 50, 170-175.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.005>
- Ferran, A., Gimeno, T., Ouadah, N., Pausas, J. G., & Vallejo, R. (2002). *Fire severity and seedling establishment in Pinus halepensis woodlands, eastern Iberian Peninsula*. 9.
- Galiana Martín, L. (2012). Las interfaces urbano-forestales: Un nuevo territorio de riesgo en España. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 58.
<https://doi.org/10.21138/bage.2065>
- García, A., Llovería, R. M., Pérez-Cabello, F., & Vlassova, L. (s. f.). *LA SEVERIDAD DEL FUEGO: REVISIÓN DE CONCEPTOS, MÉTODOS Y EFECTOS AMBIENTALES*. 14.
- García, J., Gilabert, M. A., & González, J. (1997). *Acerca de los Índices de Vegetación*. 11.
- Giglio, L., Randerson, J. T., Werf, G. R. van der, Kasibhatla, P. S., Collatz, G. J., Morton, D. C., & DeFries, R. S. (2010). Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences*, 7(3), 1171-1186.
<https://doi.org/10.5194/bg-7-1171-2010>
- González, M. E. (2005). Fire history data as reference information in ecological restoration. *Dendrochronologia*, vol.22(n° 3), 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.04.001>
- González, M. E., Lara, A., Urrutia, R., & Bosnich, J. (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33°-42° S). *Bosque (Valdivia)*, 32(3), 215-219. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002>
- González-Cabán, A. (2013). Memorias del cuarto simposio internacional sobre políticas, planificación y economía de los incendios forestales: Cambio climático e incendios forestales; 2012 noviembre 5–11; Ciudad de México, México. *Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-245, (Español)*. Albany, CA: Departamento de Agricultura de Los EE.UU., Servicio Forestal,

Estación de Investigación Del Pacífico Suroeste. 436 p, 245(ES).

<https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-245ES>

Graham, R. T., Jain, T. B., & Pilliod, D. S. (2004). Tongue-tied: Confused meanings for common fire terminology can lead to fuels mismanagement. *Wildfire. July/August: 22-26.*, 22-26.

Greenbaum, N., Tessler, N., & Wittenberg, L. (2016). Vegetation cover and species richness after recurrent forest fires in the Eastern Mediterranean ecosystem of Mount Carmel, Israel.

The Science of Total Environment, 572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.113>

Ilustre Municipalidad de Pumanque. (2019). *PLAN DE DESARROLLO COMUNAL 2019-2025.*

Google Docs.

https://drive.google.com/file/d/1einSji4Yrd4sZKfXkymLVly5c4T3giyp/view?usp=sharing&usp=embed_facebook

INE. (2017). *Pumanque Reportes Estadísticos Comunes.*

<https://reportescomunales.bcn.cl/2017/index.php/Pumanque/Poblaci%C3%B3n>

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. (s. f.). *Índice NBR del incendio de Moguer-Doñana.*

Recuperado 19 de agosto de 2019, de

http://www.inta.es/opencms/export/sites/default/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry_1500630790681

Instituto Nacional de Técnica Espacial. (s. f.). *Imágenes Sentinel de Incendios Forestales.*

Recuperado 26 de agosto de 2019, de

http://www.inta.es/opencms/export/sites/default/INTA/ca/blogs/copernicus/BlogEntry_1499417015930#

Keeley, J. E. (1991). Seed germination and life history syndromes in the California chaparral. *The*

Botanical Review, 57(2), 81-116. <https://doi.org/10.1007/BF02858766>

- Key, C. H. (2006). Ecological and Sampling Constraints on Defining Landscape Fire Severity. *Fire Ecology*, 2(2), 34-59. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0202034>
- Lloret, & Salvador. (1995). *Germinación en el laboratorio de varias especies arbustivas mediterráneas: Efecto de la temperatura*. <https://core.ac.uk/download/pdf/39000907.pdf>
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2014). *Clasificación de pisos de Vegetación y Análisis de representatividad Ecológica de áreas propuestas para la protección en la Ecoregión*. <https://es.scribd.com/doc/264636100/informe-ecorregion-valdiviana-luebert-pliscoff-pdf>
- Marchetti, P. (2019, junio 18). *Chile y su meta de ser «carbono neutral»: El ambicioso camino de los otros países que también se propusieron serlo | Emol.com*. Emol. <https://www.emol.com/noticias/Economia/2019/06/18/951626/Chile-y-su-meta-de-ser-carbono-neutral-El-ambicioso-camino-de-los-otros-paises-que-tambien-se-propusieron-serlo.html>
- Mataix, J. (2000). *Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales: Contribución a su conservación y regeneración* [Tesis doctoral, Alicante]. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/9988>
- Miller, G. T. (2008). Ciencia ambiental Desarrollo sostenible Un enfoque integral. *Innovación Educativa*, 8(45). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179420818010>
- Modugno, S., Balzter, H., Cole, B., & Borrelli, P. (2016). Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland–Urban Interface areas in Europe. *Journal of Environmental Management*, 172, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013>
- Mostrador. (2017, enero 20). *[Fotos] Incendio en Pumanque se convierte en el más catastrófico de los últimos 50 años*. El Mostrador. <https://www.elmostrador.cl/noticias/multimedia/2017/01/20/fotos-incendio-en-pumanque-se-convierte-en-el-mas-catastrofico-de-los-ultimos-50-anos/>

- Mouillot, F., & Field, C. B. (2005). Fire history and the global carbon budget: A 1°× 1° fire history reconstruction for the 20th century. *Global Change Biology*, 11(3), 398-420.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00920.x>
- Muñoz, P. (2013). *Tema Indices de vegetación, Pedro Muñoz A.pdf*.
<http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Omi, P. N. (2005). *Forest Fires: A Reference Handbook*. ABC-CLIO.
- Pausas, J. G., & Verdú, M. (2008). Fire Reduces Morphospace Occupation in Plant Communities. *Ecology*, 89(8), 2181-2186. <https://doi.org/10.1890/07-1737.1>
- Pechony, O., & Shindell, D. T. (2010). Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(45), 19167-19170. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003669107>
- Peña-Fernández, E. (s. f.). *Incremento de los Incendios Forestales en Bosques Naturales y Plantaciones Forestales en Chile*. 18.
- Power, M., Marlon, J., Natalie, O., Bartlein, P., Harrison, S., Mayle, F., Ballouche, A., Bradshaw, R., Carcaillet, C., Cordova, C., Mooney, S., Moreno, P., Prentice, I., Thonicke, K., Tinner, W., Whitlock, C., Zhang, Y., Zhao, Y., Ali, A., & Zhang, J.-H. (2008). *Changes in fire regime since the Last Glacial Maximum: An assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data*.
- Sacristán, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista científica de la sociedad Española de Acuicultura*, 24, 13-41.
- Salinas, F. (2019). *Modelo forestal en respuesta al Cambio Climático para el desarrollo sustentable y la erradicación de la pobreza*.

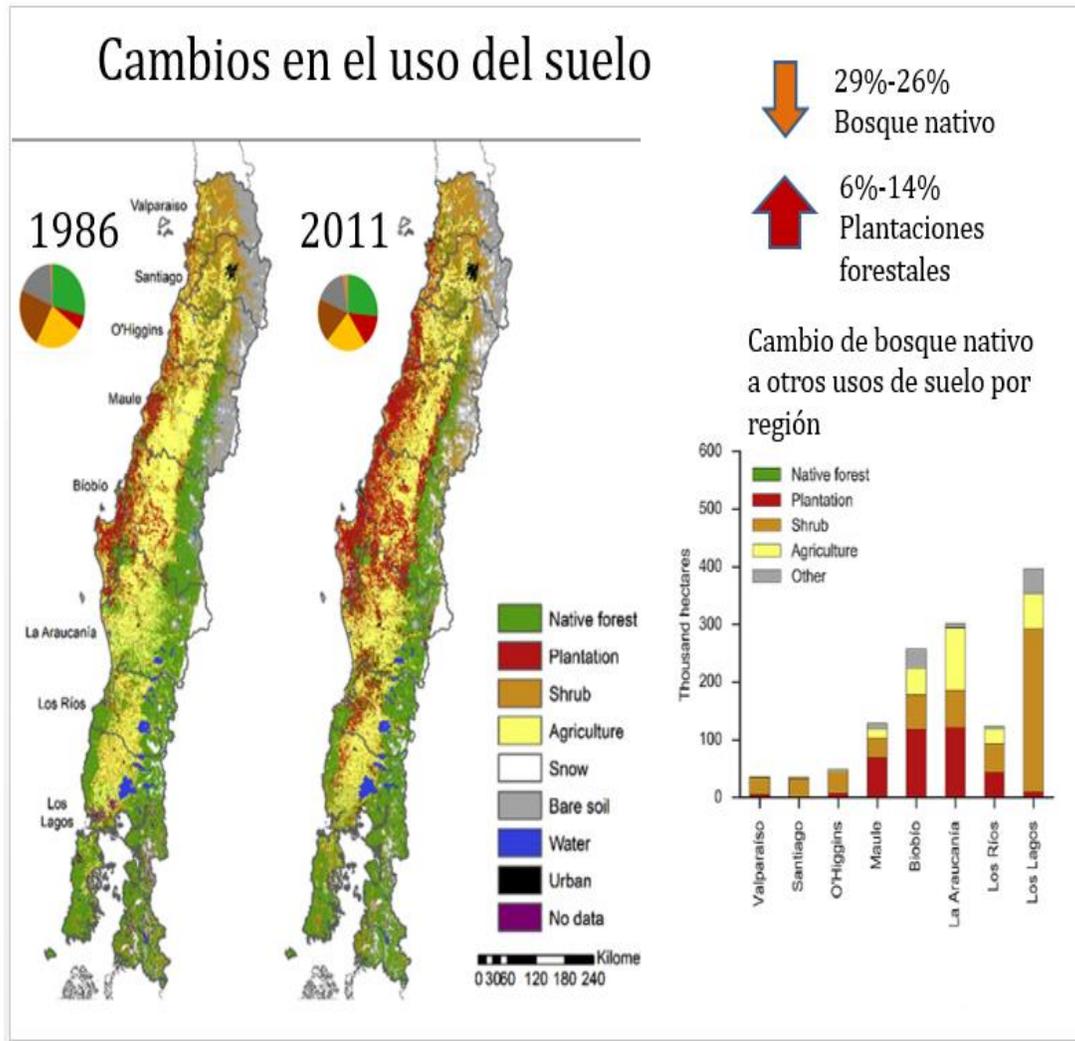
https://www.senado.cl/appsenado/index.php?mo=comisiones&ac=sesiones_celebradas&idcomision=941&tipo=3&legi=0&ano=2019&desde=0&hasta=0&comi_nombre=de%20Desaf%C3%ADos%20del%20Futuro,%20Ciencia,%20Tecnolog%C3%ADa%20e%20Innovaci%C3%B3n&idsesion=13922&idpunto=%%SESIONES_CELEBRADAS.IDPUNTO%%&fecha=08/07/2019&inicio=17:15&termino=20:47&lugar=Sala%20de%20Sesiones,%20Edificio%20del%20Senado%20en%20Santiago&listado=2

- Sánchez, C. (2016). Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 33(1), 128-138. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2016.331.2014>
- Schroter, D. (2005). Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science*, 310(5752), 1333-1337. <https://doi.org/10.1126/science.1115233>
- Sirca, C., Casula, F., Bouillon, C., García, B. F., Fernández Ramiro, M. M., Molina, B. V., & Spano, D. (2017). A wildfire risk oriented GIS tool for mapping Rural-Urban Interfaces. *Environmental Modelling & Software*, 94, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.024>
- Syphard, A. D., Keeley, J. E., Massada, A. B., Brennan, T. J., & Radeloff, V. C. (2012). Housing Arrangement and Location Determine the Likelihood of Housing Loss Due to Wildfire. *PLOS ONE*, 7(3), e33954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033954>
- Takahashi, K. (s. f.). *Cambio climático: Conceptos básicos*. Recuperado 9 de octubre de 2019, de <http://www.met.igp.gob.pe/cambioclimatico/conceptos.html>
- Tele 13. (2017, 01). *Incendio en Pumanque: 70 damnificados y 200 evacuados | Tele 13*. <https://www.facebook.com/teletrece>. <https://beta.t13.cl/noticia/nacional/incendio-pumanque-70-damnificados-y-200-evacuados>

Valenzuela, N. V. U., & Bueno, M. F. C. (2012). Incendios forestales: Principales consecuencias económicas y ambientales en Chile. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo - RIAT*, vol. 7(n°1), 18-24. <https://doi.org/10.4067/riatvol7iss1pp18-24%0718-235X>

7. ANEXOS

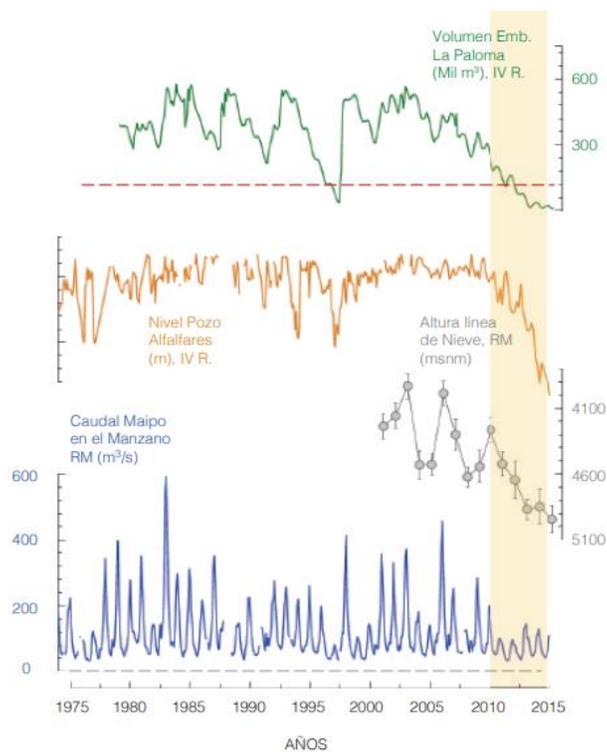
Anexo 1: Cambios en el uso de suelo en Chile, período 1986 – 2011.



Cambios en el uso de suelo en la zona centro-sur de Chile. En la figura se observa un alto desarrollo y aumento de plantaciones forestales en los últimos años, en disminución de la cantidad de bosque nativo, en las regiones de O'Higgins y La Araucanía.

Fuente: Información recopilada por Salinas (2019).

Anexo 2: Impactos de la megasequía en casos nacionales.



Evolución temporal del volumen del embalse La Paloma (línea verde); nivel freático del pozo los alfalfaes (línea color naranja); altura de la línea de nieve durante el mes de enero en la Cordillera de los Andes (línea gris); y caudal de la estación río Maipo en el Manzano.

Fuente: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015).

Anexo 3: Comparación de pluma de sedimentos en ríos de Chile central entre 2008-2013.

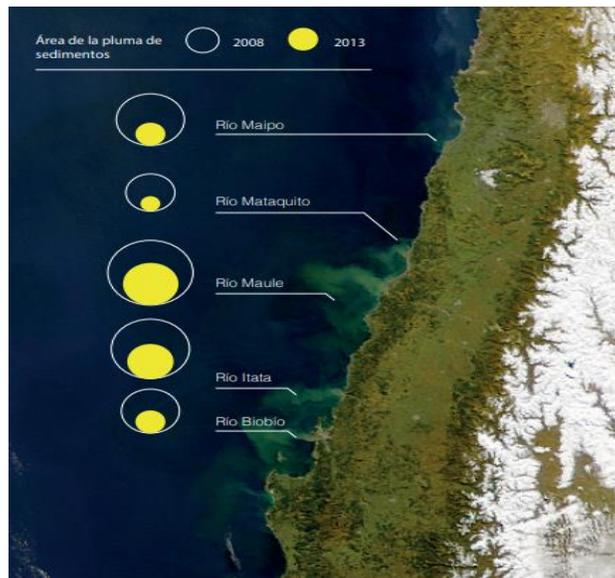
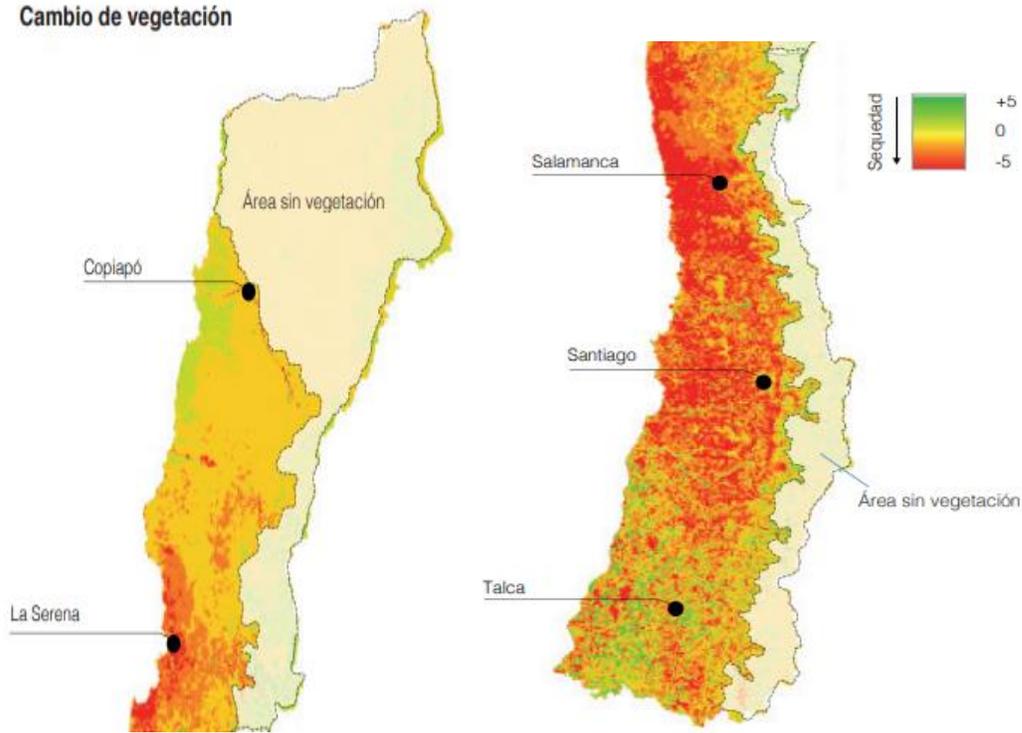


Imagen satelital (SeaWIFS, NASA, la cual muestra el color del océano ilustrando plumas de sedimentos generadas por los ríos de Chile central. La dimensión de los círculos es directamente proporcional al área de las plumas en un período de invierno “normal” (2008), y un invierno de la megasequía (2013).

Fuente: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015).

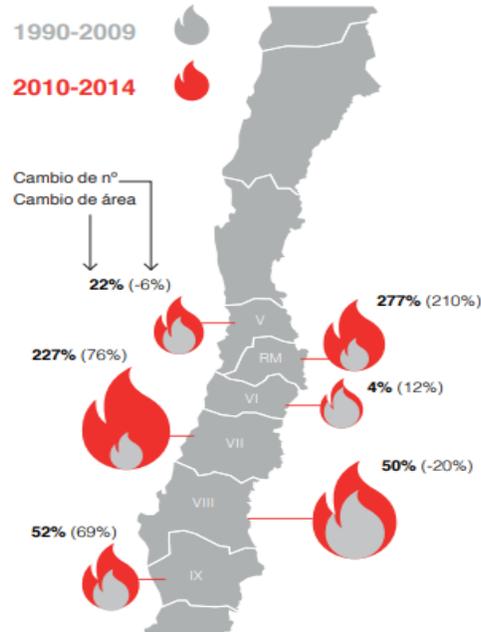
Anexo 4: Demostración de la megasequía mediante MODIS.



Diferencia del Índice Mejorado de Vegetación (EVI), demostrada por sensor MODIS, durante el inicio de la primavera (julio-septiembre), entre la megasequía (promedio entre 2010-2014), y la década anterior (promedio 2000-2014), y la década anterior (promedio 2000-2009).

Fuente: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015).

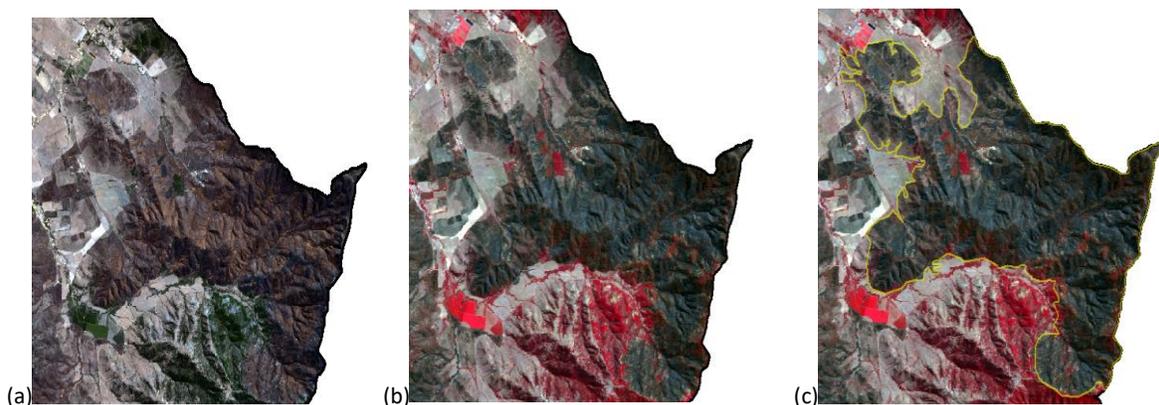
Anexo 5: Proporción de incendios forestales período 1990-2014.



En la figura, cuyas estadísticas fueron proporcionadas por la CONAF, los símbolos del fuego son directamente proporcionales al área quemada anualmente por incendios de gran magnitud (sobre 200 hectáreas), calculado para cada región durante el período 2010 – 2014 (período de la megasequía, en símbolos rojos), y el período base de 2000-2000 (símbolos grises). Los números hacen referencia al aumento porcentual del área quemada. La información entre paréntesis indica el aumento porcentual del número de incendios de magnitud entre el período de 2010-2014 y 2000-2009.

Fuente: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (2015).

Anexo 6: Método de digitalización de incendios.



Las tres figuras anteriores corresponden a un segmento de la imagen comunal ubicada hacia el este de Pumanque. En la primera se representa una composición a color real (bandas 4, 3 y 2); mientras que la segunda corresponde a una en falso color (bandas 8, 4, y 3), en la cual se representa de mejor forma las áreas quemadas en colores oscuros, lo que permite abrir paso a la digitalización de los incendios mediante polígonos, cuyo resultado es el que se muestra en la tercera imagen, digitalización que suma tanto el uso de un análisis visual como digital.

Fuente: Elaboración propia.