



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CARACTERÍSTICAS DE SUELOS DE LA ZONA NILAHUE PICHILEMU,
AFECTADA POR LA CATÁSTROFE INCENDIARIA DEL 2017,
REGIÓN DE O'HIGGINS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

WALTER TAPIA FUENTES

PROFESOR GUÍA:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARISOL LARA CASTILLO
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geólogo

POR: Walter Tapia Fuentes

FECHA: 27 de Agosto 2018

PROFESORA GUÍA: Sofía Rebolledo Lemus

Características de suelos de la zona Nilahue- Pichilemu, afectada por la catástrofe incendiaria de 2017, Región de O'Higgins.

Los incendios forestales destruyen miles de hectáreas de bosques cada año alrededor del mundo, especialmente durante los meses de verano, y Chile no es la excepción. Durante los meses de verano del año 2017, Chile sufrió una de las mayores catástrofes incendiarias de su historia, en las que se consumieron más de 500 mil hectáreas de bosque a lo largo del país, siendo la VI región del Libertador Bernardo O'Higgins una de las más damnificadas.

La literatura indica que a causa de las altas temperaturas alcanzadas es que los suelos pueden llegar a sufrir importantes cambios químicos, físicos, geológicos y geotécnicos. De acuerdo a lo anterior es que este estudio busca caracterizar las modificaciones geológicas de los suelos de la zona Nilahue-Pichilemu por el paso del mega incendio en el verano de 2017.

Diferencias en los niveles de destrucción en el área denotan desigualdades de temperatura y tiempo de exposición mientras se desarrollaba el incendio. Por lo anterior, la metodología empleada dividió el área quemada en cuatro zonas de trabajo separadas entre sí según el grado de daño, o severidad, que sufrió la vegetación por el fuego (alto, medio, bajo y zona no quemada).

Las zonas donde el fuego fue de intensidad alta y media experimentaron modificaciones mineralógicas, siendo en algunos casos muy pronunciadas. Dentro de los cambios resalta la aparición de propiedades magnéticas y cambios de tonalidades en el suelo superficial que estuvo en contacto directo con el fuego. Los resultados muestran que el magnetismo aumenta en la zona donde el fuego tuvo severidad alta. La coloración por su parte cambió de tonos marrones a negros/grises y rojizos en la zona de mayor severidad. Los suelos de la zona, principalmente suelos residuales de rocas intrusivas graníticas contienen goethita, la cual se transforma en maghemita a alta temperatura. Este cambio sería el responsable de la variación en coloración y magnetismo de las muestras analizadas.

A pesar de las temperaturas y nivel de destrucción alcanzados en este incendio, solo fue posible detectar cambios geológicos macroscópicos a nivel superficial en los suelos quemados y es necesario realizar estudios más acabados para ver si existen modificaciones microscópicas en dichos suelos.

Agradecimientos.

Sin lugar a duda son muchas las personas a las que tengo que agradecer, que permitieron que pudiera culminar de buena manera un largo y duro tramo de mi vida.

En primer lugar, a mi familia, por darme las herramientas, la confianza y tener la paciencia para que llevara a cabo mis estudios superiores. A mi primo Franco, que es más un hermano, por haber facilitado el auto y ser el chofer de este trabajo.

A mis amigos del colegio Leo, Tomas, Coto y Juaco por esas tardes de ocio, comida, carretes y a veces de deporte que hacían olvidar la universidad, aunque sea por un rato.

A mis amigos de sección y la generación de Geolokos. En especial al Nico por siempre apañar a todo y ser la influencia sana del grupo, al Beto por esas tardes de piscolas y chelas que nunca podían faltar para liberar el estrés de la u y a la Tami por siempre estar ahí para escucharme, darme consejos, retarme y darse la lata de ayudarme con los trabajos de la u y revisar mi presentación antes de defender la tesis.

A la gente de vóley, que a pesar de haber aparecido hace poco se siente como si estuvieran ahí hace años. A la jefa Nat por dar siempre la cuota de alegría e hiperactivismo en cada entrenamiento, a los cabros Alex, Diego, Jara, Rafa, Gabo y Manu por esos partidos y comidas post entrenamiento que relajaban las tardes. Y a la tía Nicole por ser un amor de persona, llamarme para cada fecha importante y hacerme reír con sus tonteras.

Y como olvidar a mi amiga Jaque, la mejor odontóloga del país que se encargó de hacerme reír durante mi viaje a USA y de alegrarme muchas tardes con su alegría y simpatía.

Y finalmente a la comisión que estuvo detrás de todo esto. A la profe Sofía por ser una excelente guía, siempre disponible para ayudar y hacer las correcciones necesarias. A la profe Marisol, por su buena voluntad a la hora de responder dudas y al profe Sergio por las correcciones que llevo a cabo.

Cado uno aporto su granito de arena en este proceso y les estaré eternamente agradecido, solo me resta decir: ¡¡¡ Gracias Totales!!!

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	9
1.1	Formulación del estudio propuesto	9
1.2	Objetivos	10
1.2.1	Objetivos específicos.	10
1.3	Ubicación y vías de acceso	10
1.4	Clima de la región de O'Higgins.	12
1.5	Antecedentes de incendios en la VI región	15
1.6	Efectos de un incendio en los suelos.	15
2	Metodología	19
2.1	Revisión de antecedentes.	19
2.2	Procesamiento de imágenes satelitales.	19
2.3	Campaña de terreno	22
2.3.1	Análisis geotécnico	23
2.4	Trabajo de laboratorio	24
2.4.1	Descripción macroscópica de muestras: Lupa binocular.	24
2.4.2	Espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR). ..	25
2.4.3	Límites de Atterberg.....	30
2.4.4	Análisis granulométrico.....	36
2.5	Consistencia de agregados.	37
2.5.1	Determinación de la consistencia del suelo húmedo	38
2.5.2	Determinación de la consistencia del suelo seco.....	38
2.5.3	Magnetismo	39
3	Geología.....	40
3.1	Marco geológico	40
3.1.1	Complejos de acreción de la Cordillera de la Costa en Chile Central (Paleozoico tardío).	41
3.1.2	Rocas metamórficas (Pz4b).....	42
3.1.3	Rocas intrusivas	42
3.1.4	Rocas sedimentarias	43
3.1.5	Estructuras.....	43
3.2	Geología y Geomorfología local	45
3.2.1	Geomorfología	45
3.2.2	Geología	47

4	Efectos del incendio	49
4.1	Vegetación	49
4.2	Grados de severidad del incendio	51
a)	P1: Severidad baja.....	51
b)	P2: Severidad intermedia.....	53
c)	P4: Punto severidad alta	54
d)	P5: Muestra testigo	57
4.3	Descripción macroscópica muestras. (Lupa binocular)	59
4.4	Análisis FTIR.....	61
4.5	Límites de Atterberg	66
4.6	Análisis de granulometría	68
4.7	Ensayo de permeabilidad	70
4.8	Consistencia de agregados.....	72
5	Conclusiones y Recomendaciones.....	74
6	Bibliografía	75
7	Anexos	80
	Anexo A: Descripción macroscópica muestras. (Lupa binocular).....	80
	Anexo B: Secado de muestras.....	89
	Anexo C: Resultados granulometría.....	90
	a) Muestras superficiales	90
	b) Muestras en profundidad	91
	Anexo D: Clasificación Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).....	91
	Muestras superficiales.....	92
	Muestras en profundidad	92
	Diámetro característico	93
	Coeficientes de curvatura y uniformidad	93
	Anexos E: Espectros FTIR	93
	Muestra superficiales.....	93
	Muestras en profundidad	95
	Anexo F: Clasificación taxonómica de la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos).....	97
	Anexo G: Clasificación textural de la USDA.....	98

Índice de figuras

Figura 1.1: Mapa VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins.	11
Figura 1.2: Delimitación del área afectada por el incendio de 2017.....	11
Figura 1.3: Comunas en las que se ubica el terreno de estudio	12
Figura 1.4: Mapa climatológico de la región de O'Higgins.....	13
Figura 1.5: Temperaturas máximas alcanzadas durante los meses de Enero y Febrero	14
Figura 1.6: Precipitaciones del año 2017 de la zona de catástrofe.....	14
Figura 1.7: Distribución mensual de los incendios registrados en Chile	15
Figura 1.8: Efectos del fuego en la repelencia.....	17
Figura 2.1: Procesamiento de imágenes satelitales	19
Figura 2.2: Evolución de la vegetación	20
Figura 2.3: Zona incendiada entre los meses de enero y febrero.....	21
Figura 2.4: Puntos de muestreo de la zona de estudio.....	22
Figura 2.5: Ilustración de una calicata en terreno	23
Figura 2.6: Ensayo de permeabilidad llevado a cabo en terreno	23
Figura 2.7: Lupa binocular utilizada	24
Figura 2.8: Materiales utilizados en la preparación de muestras para FTIR	25
Figura 2.9: Preparación de las muestras para FTIR	27
Figura 2.10: Ejemplo de espectro obtenido con FTIR.....	28
Figura 2.11: Gráfico Absorbancia (A) vs N° de onda (cm ⁻¹).....	29
Figura 2.12: Identificación mineral con Matlab 6.5.....	30
Figura 2.13: Límites de Atterberg.....	31
Figura 2.14: Diagrama de plasticidad según los límites de Atterberg	32
Figura 2.15: Máquina de Casagrande	34
Figura 2.16: Curva de flujo. Cálculo del límite líquido	34
Figura 2.17: Bastoncitos formados para determinar el límite plástico.....	35
Figura 2.18: Mallas utilizadas para análisis de tamaño de partículas	36
Figura 2.19: Ejemplo de curva granulométrica	37
Figura 2.20: Análisis de consistencia de agregados de suelo	38
Figura 2.21: Aplicación de un imán sobre las muestras de suelo	39
Figura 3.1: Principales morfoestructuras de la segmentación andina	40
Figura 3.2: Mapa geológico de la zona de Pichilemu	41
Figura 3.3: Mapa geológico que ilustra la ubicación de los complejos metamórficos... ..	42
Figura 3.4: Estructuras geológicas de la zona de Pichilemu.....	44
Figura 3.5: Mapa altitudes de la zona de estudio.....	45
Figura 3.6: Mapa de pendientes de la zona de estudio	46
Figura 3.7: Mapa de exposición al sol de la zona de estudio.....	46
Figura 3.8: Distribución taxonómica de los distintos suelos.....	48
Figura 4.1: Tipo de vegetación presente antes del incendio.....	49
Figura 4.2: Evolución de la vegetación	50
Figura 4.3: Contraste entre la base quemada y copa no quemada de los árboles.....	51
Figura 4.4: Suelo afectado por las llamas.....	52
Figura 4.5: Daños provocados por el paso del fuego.....	52

Figura 4.6: Calicata fabricada en la zona de severidad baja.....	53
Figura 4.7: Estado de la vegetación en zona de severidad intermedia	53
Figura 4.8: Contraste entre el suelo en profundidad y el suelo en superficie	54
Figura 4.9: Zona de severidad alta	55
Figura 4.10: Sector severidad alta	55
Figura 4.11: Calicata fabricada en el sector de alta severidad.....	56
Figura 4.12: Raíz adyacente al punto de muestreo de severidad alta	57
Figura 4.13: Estado de la vegetación en el área no afectada por las llamas.	57
Figura 4.14: Suelo en profundidad.....	58
Figura 4.15: Muestra superficial severidad alta de incendio con aumento de 15X y 45X.....	59
Figura 4.16: Muestra superficial de suelo de severidad alta	59
Figura 4.17: Análisis FTIR de las muestras obtenidas en terreno.....	61
Figura 4.18: Carta de plasticidad	66
Figura 4.19: Análisis de granulometría de los suelos superficiales.....	68
Figura 4.20: Análisis granulométrico de los suelos extraídos a 20 cm de profundidad	69
Figura 4.21: Coeficiente de permeabilidad de diferentes tipos de suelo	70
Figura 7.1: Muestra superficial de suelo con severidad baja	80
Figura 7.2: Muestra a simple vista severidad baja	81
Figura 7.3: Muestra en profundidad de suelo con severidad baja con un aumento de 25X.....	82
Figura 7.4: Suelo de severidad baja en profundidad.....	82
Figura 7.5: Muestra superficial severidad intermedia con un aumento de 35X.....	83
Figura 7.6: Muestra superficial severidad intermedia con aumento de 17X.....	83
Figura 7.7: Suelo de severidad moderada	84
Figura 7.8: Muestra en profundidad de severidad intermedia con aumento de 35X y 45X.....	85
Figura 7.9: Suelo de severidad moderada en profundidad	85
Figura 7.10: Muestra en profundidad severidad alta de incendio con aumento de 20X y 45X.....	86
Figura 7.11: Suelo en profundidad zona de severidad alta.....	86
Figura 7.12: Muestra testigo superficial con aumento de 10.5X y 45X	87
Figura 7.13: Muestra testigo superficial	87
Figura 7.14: Muestra testigo en profundidad con aumento de 6.7 y 45X.....	88
Figura 7.15: Muestra testigo en profundidad	88
Figura 7.16: Implementos utilizados en proceso de secado de muestras.....	89
Figura 7.17: Espectro de muestra superficial de severidad intermedia (P2-A)	93
Figura 7.18: Espectro de muestra superficial de severidad alta (P4-A).	94
Figura 7.19: Espectro de muestra superficial testigo (P5-A).....	94
Figura 7.20: Espectro de muestra en profundidad severidad baja (P1-B).	95
Figura 7.21: Espectro de muestra en profundidad severidad intermedia (P2-B)..	95
Figura 7.22: Espectro de muestra en profundidad severidad alta (P4-B).	96
Figura 7.23: Espectro de muestra testigo en profundidad (P5-B).	96
Figura 7.24: Ordenes de suelo según la USDA.	97
Figura 7.25: Triángulo textural de USDA	98

Índice de tablas.

Tabla 1.1: Variabilidad de la repelencia en los suelos.....	17
Tabla 2.1: Malla estandarizadas norma ASTM.....	36
Tabla 4.1: Resumen de la descripción macroscópica	60
Tabla 4.2: Resultados ensayos de permeabilidad.....	70
Tabla 4.3: Resultados ensayos de consistencia en suelo seco	72
Tabla 7.1: Pesos de las muestras una vez puestas a secar en el horno	90
Tabla 7.2: Contenido de humead de las muestras extraídas en terreno	90
Tabla 7.3: Granulometría muestras superficiales.....	90
Tabla 7.4: Granulometría muestras en profundidad.....	91
Tabla 7.5: Clasificación de suelo superficiales (USCS).....	92
Tabla 7.6: Clasificación de suelos en profundidad (USCS).....	92
Tabla 7.7: Diámetro característico	93
Tabla 7.8: Coeficientes de curvatura (C_c) y uniformidad (C_u).	93
Tabla 7.9: Guía resumen para la determinación al tacto.....	100

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del estudio propuesto.

Un incendio forestal corresponde al fuego que se extiende sin control en terreno forestal y silvestre. Entre sus rasgos distintivos destaca la velocidad con que se propaga desde su lugar de origen, su potencial para cambiar de dirección inesperadamente y su capacidad para superar obstáculos (como carreteras, ríos, cortafuegos, etc) (Conaf, 2017).

Los incendios traen consigo una gran cantidad de consecuencias negativas, entre las que podemos contar el daño a la flora y fauna, aumento de CO₂ a la atmósfera, alteración de balances hídricos, meteorización del suelo y eliminación de cobertura vegetal. Dado que la vegetación actúa como un estabilizante, contrarrestando el efecto gravitacional y protegiendo el suelo de la erosión (Jackson y Roering, 2008), la eliminación de esta cobertura vegetal puede desencadenar remociones en masa en sectores de alta pendiente.

Por otra parte, las altas temperaturas que se alcanzan en un incendio forestal llevan a la degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y sobre todo a la pérdida de sus partículas más finas por la erosión provocada (Greenpeace, 2016). Se produce, además, la impermeabilización superficial de los suelos debido a la presencia de cenizas y al efecto provocado por el intenso calor, que calcina las arcillas, generando un efecto de “greda cocida” en la superficie, lo que conlleva a un aumento considerable de la escorrentía superficial, durante eventos de precipitaciones, y de erosión del área afectada por las llamas. Adicionalmente, hay una removilización de partículas hidrofóbicas hacia niveles inferiores, las cuales disminuyen la permeabilidad del terreno en profundidad (Haigh, 2009).

Desde la mitad del siglo XX que Chile ha visto en incremento la cantidad de incendios forestales que afectan su territorio y por ende el total de hectáreas quemadas ha ido en un aumento considerable. Se estima que entre los años 1985-2016 alrededor de 1.878.000 hectáreas se han visto afectadas por el paso del fuego, de las cuales cerca del 90% corresponden a zonas forestales. Entre los sectores más afectados por este problema, se encuentra la región de Libertador Bernardo O'Higgins (VI región de Chile) con cerca de 247.000 hectáreas devastadas por el fuego, en el mismo periodo mencionado con anterioridad (Conaf, 2017).

Entre los meses de enero y febrero de 2017 tuvo lugar la mayor catástrofe incendiaria en el país, donde se consumieron más de 500 mil hectáreas (Conaf, 2017), de las cuales cerca del 20% corresponden a la VI región y donde se localizó uno de los incendios más grandes y devastadores del que se tenga registro en Chile. Este siniestro afectó a la ruta conocida como Nilahue Barahona- Pichilemu, lo que incluye específicamente a las localidades de Pumanque, Marchigüe (también escrito Marchihue), Pichilemu, La Estrella y Litueche, en el secano costero de la región de O'Higgins, y que consumió cerca de 50 mil hectáreas.

La nula información, sumada a las dimensiones de esta catástrofe nacional, hace indispensable el estudio del impacto y de las consecuencias del fuego en los suelos de nuestro país, con el fin de tener conocimiento de los posibles cambios mineralógicos producidos, que por ende pueden traer consecuencias para la flora de la zona, y de posibles sectores con riesgo de remociones en masa que significarían un peligro para los habitantes del sector.

1.2 Objetivos

Este estudio tiene como objetivo principal el análisis geológico de suelos afectados por las llamas en la zona de Nilahue Barahona - Pichilemu, en la región de O'Higgins, luego de la catástrofe incendiaria del verano de 2017.

1.2.1 Objetivos específicos.

- Determinar las propiedades físicas de los suelos pre y post incendio.
- Determinar la mineralogía pre y post incendio.

1.3 Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio se encuentra localizada en la VI región del Libertador Bernardo O'Higgins, entre los 33°50' y 34°45' de latitud sur (Figura 1.1), y comprende las localidades de Marchihue, Pumanque, La Estrella, Litueche y Pichilemu (Figura 1.2 y Figura 1.3).

Las vías de acceso son variadas, comprendiendo carreteras en una primera instancia para luego dar paso a caminos de tierra una vez adentrado en los cerros que están ubicados en el área de interés.



Figura 1.1: Mapa VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins. (Turiscom, 2004)

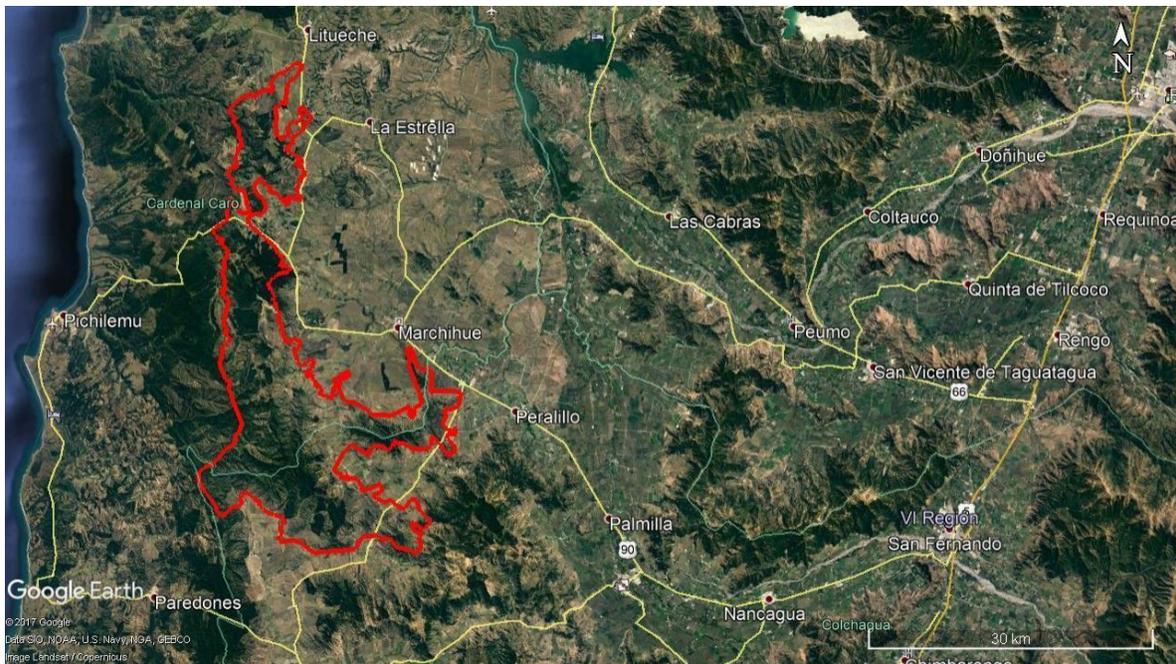


Figura 1.2: Delimitación (en rojo) del área afectada por el incendio de 2017 y que corresponde a la zona de estudio (Google Earth 2017).

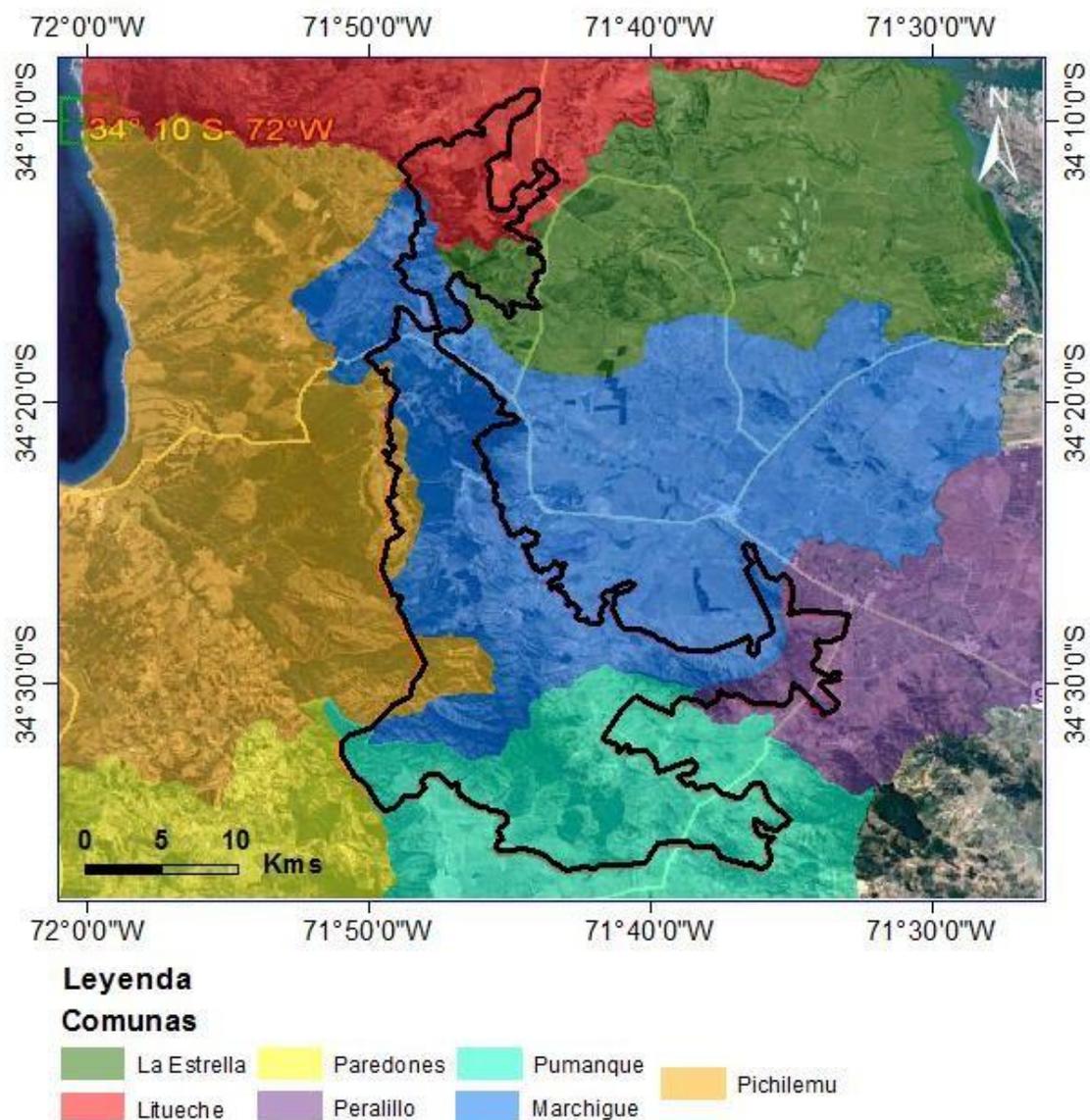


Figura 1.3: Comunas en las que se ubica el terreno de estudio (marcada en negro).

1.4 Clima de la región de O'Higgins.

La VI región de nuestro país se caracteriza por poseer más de un clima en su territorio (Figura 1.4), específicamente, la zona de estudio se ubica más hacia el sector costero (Cordillera de la Costa) en donde existe un clima templado cálido con estación seca prolongada de siete a ocho meses junto con una gran nubosidad hacia las planicies costeras y el lado occidental de la Cordillera de la Costa.

Este tipo de clima está condicionado por la cercanía al mar, que modera las temperaturas y produce una gran cantidad de humedad que lleva a que varios días del año sean nublados. Las precipitaciones se concentran en invierno (concentrándose el 80% entre los meses de mayo y agosto), donde las sumas anuales varían entre algo más de 500 mm en la parte norte y 800 mm en la parte sur de la región (Dirección Meteorológica de Chile, sf)

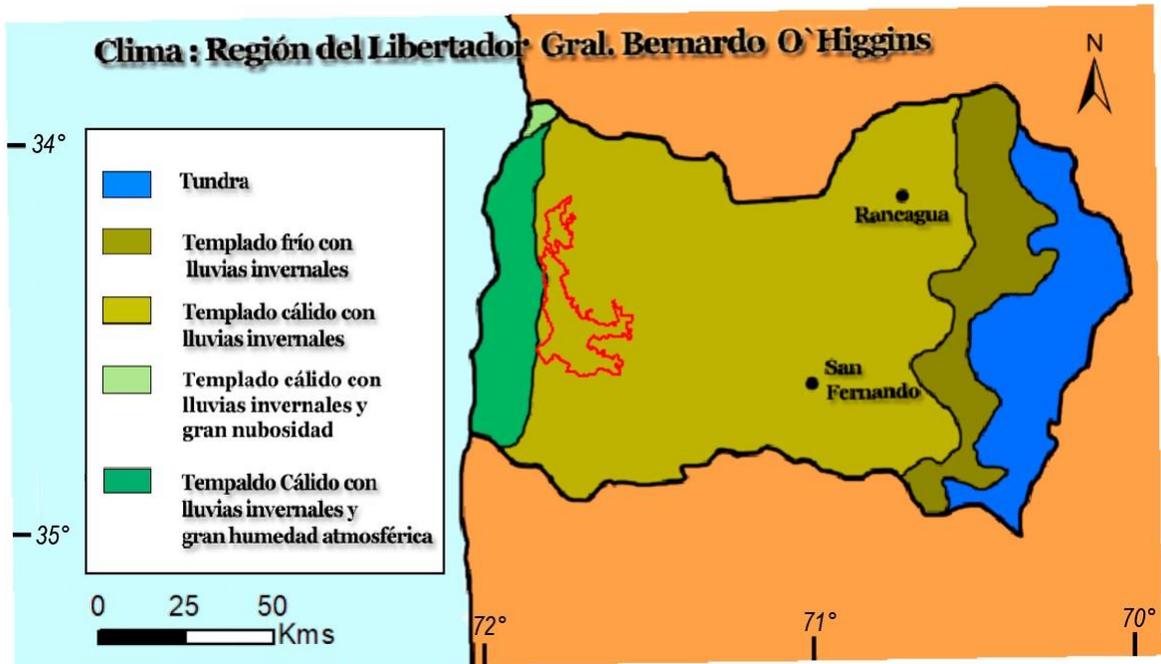
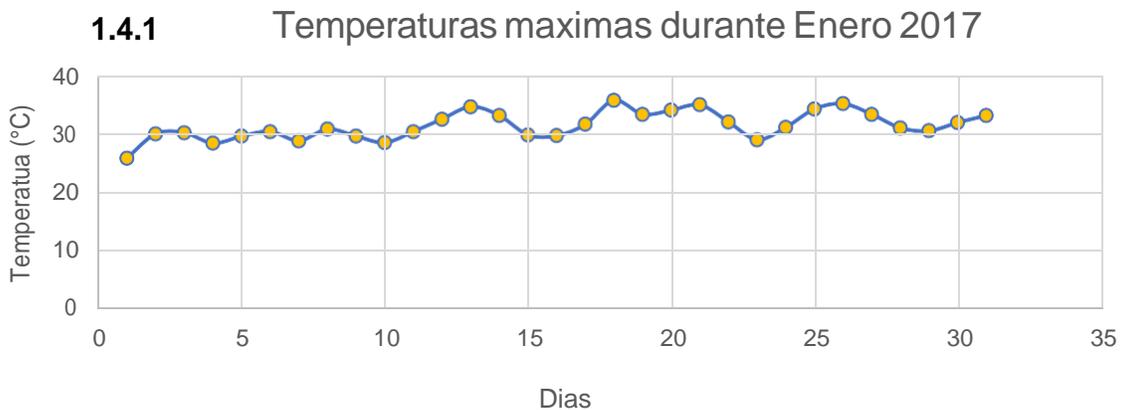


Figura 1.4: Mapa climatológico de la región de O'Higgins. Delimitado en rojo se ilustra el área afectada por el fuego en el verano de 2017. (Dirección meteorológica de Chile, sf)

Para efectos del incendio, es importante tener presente las temperaturas alcanzadas durante los meses de enero y febrero en la región debido a que el clima juega un papel a la hora de la extinción de las llamas. Como se puede observar en la Figura 1.5 las temperaturas máximas oscilaban alrededor de los 30°C, lo que dificultó el control del fuego y la pérdida de muchas hectáreas de vegetación.



1.4.2 Temperatura máxima durante Febrero 2017

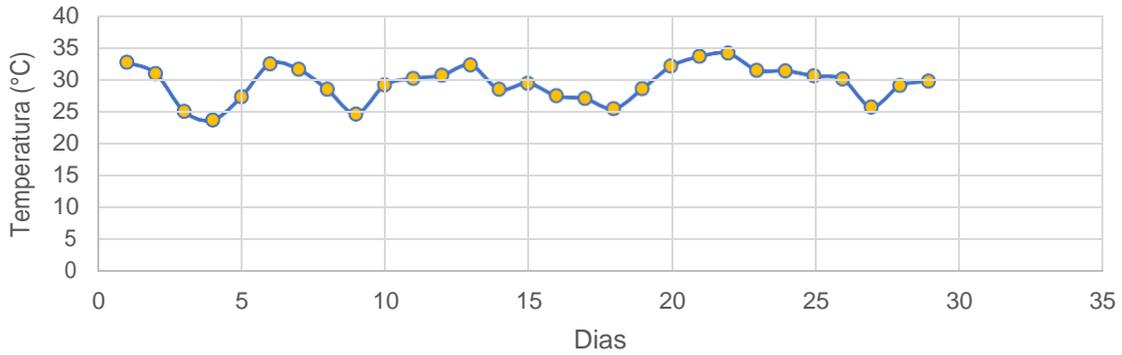


Figura 1.5: Temperaturas máximas alcanzadas durante los meses de Enero (A) y Febrero (B) de 2017 en la zona de catástrofe incendiaria. (Estación meteorológica de Nilahue- La Quebrada, sf).

Otro aspecto a tener en consideración son las precipitaciones posteriores a la emergencia, ya que las lluvias podrían haber removido las capas más superficiales de suelo (por tanto puede existir una pérdida de información) y, además, tener un impacto importante para el crecimiento post-incendio. Como se puede apreciar en la Figura 1.6, el agua caída en la zona cae dentro de lo que podría considerarse un año relativamente normal en términos de precipitación (500-800 mm).

Agua caída (mm) en estación Nilahue- Quebrada (región O'Higgins) en 2017.

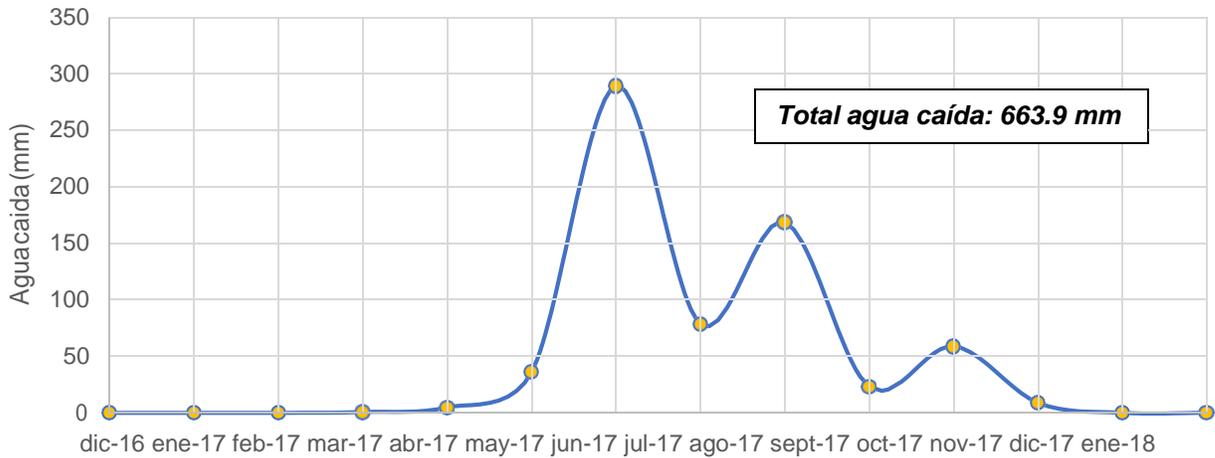


Figura 1.6: Precipitaciones del año 2017 de la zona de catástrofe. (Estación meteorológica de Nilahue- La Quebrada, sf).

1.5 Antecedentes de incendios en la VI región.

Históricamente, debido a las condiciones climáticas favorables, los incendios forestales en Chile se concentran en la temporada de verano ósea entre los meses de diciembre y febrero principalmente (ver Figura 1.7) (Conaf, 2017).

DISTRIBUCION MENSUAL OCURRENCIA HISTORICA 1985-2017

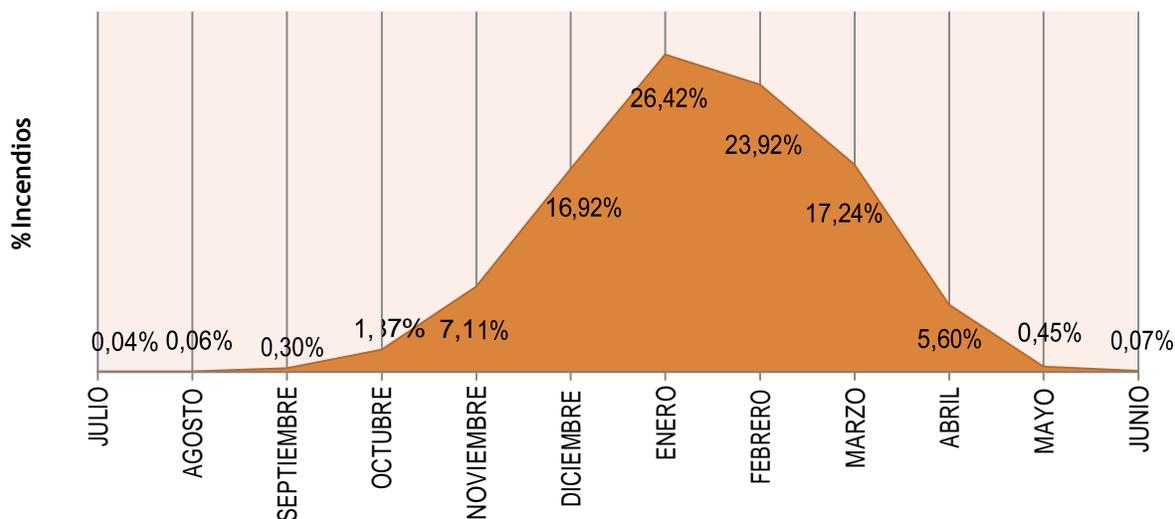


Figura 1.7: Distribución mensual de los incendios registrados en Chile desde el año 1985 a 2017. Se puede apreciar la concentración de estos en los meses de la temporada de verano (Conaf, 2017).

La región de O'Higgins de Chile Central concentra alrededor del 4,6%, lo que en cantidad son 10,208 siniestros, del total de incendios que se tienen registros (desde el año 1976 a la fecha). Esto ha traído como consecuencia que se hayan consumido 282.877,46 hectáreas de vegetación. Estadísticamente se producen 8 incendios de gran magnitud, mayor a 200 hectáreas de extensión, en la VI región cada año (Conaf, 2017).

1.6 Efectos de un incendio en los suelos.

Existen diversos estudios que explican las diversas consecuencias que puede tener un incendio, como el que tuvo lugar en la zona de estudio durante el verano del año 2017. Entre las principales se encuentran, y las que nos interesan, son las referentes a la disminución de la vegetación, cambios de granulometría y/o mineralogía, límites de plasticidad, color y la aparición de niveles impermeables o repelentes.

Previo a describir estas modificaciones, es de suma importancia tener noción de las diferencias que existen entre los conceptos de intensidad y severidad del fuego. La intensidad hace referencia a la tasa de energía liberada (Deeming, 1977) mientras que la severidad indica los efectos del fuego en los diferentes componentes del ecosistema (DeBano, 1998).

Dado que la mayoría de la energía liberada no es transmitida hacia el suelo debido a su mala conductividad térmica, es que la duración de la combustión juega un papel fundamental en los efectos sobre el suelo (Frandsen y Ryan, 1987). Por lo tanto, la intensidad del fuego no es una buena medición para describir cambios en los suelos quemados.

Debido a lo anterior, es que en este trabajo se emplea el término de severidad, dividiendo el área del siniestro en tres zonas según el daño que sufrió la vegetación y el color del suelo (DeBano, 1998):

- **Severidad alta:** Vegetación devastada en su totalidad con enrojecimiento del suelo. La temperatura estimada estaría sobre los 500°C con un gran tiempo de exposición del suelo a las llamas.
- **Severidad intermedia:** Consumo parcial de la vegetación, con algunos árboles intactos mientras que otros totalmente carbonizados. Ennegrecimiento del suelo. La temperatura estimada estaría entre los 300°C-450°C con un tiempo moderado de exposición al fuego.
- **Severidad baja:** Árboles quemados solo en su base mientras que las ramas y hojas ubicadas en la copa estarían intactas. Ennegrecimiento del suelo. La temperatura estimada estaría entre los 100°C- 250°C con un tiempo breve de exposición al incendio.

En lo que respecta a la repelencia al agua en los suelos afectados, ésta puede verse provocada, aumentada o disminuida según la temperatura alcanzada en el suelo, las propiedades mismas del suelo y el tipo de vegetación combustionada (Bodi, 2014). La repelencia se basa principalmente en la adición de sustancias hidrofóbicas, originarias de árboles perennes, las que son liberadas por vaporización y migran por condensación hacia otros niveles (superiores o inferiores) dependiendo del tipo de vegetación quemada (Figura 1.8). Las plantas que se asocian más comúnmente con la repelencia al agua son en particular árboles con una considerable cantidad de resinas, ceras, o aceites aromáticos (eucalipto y pino) (Doerr, 2000). La repelencia al agua también puede ser aumentada por la presencia de materiales finos intersticiales, como partículas individuales y microagregados, los cuales al hacer contacto con partículas hidrofóbicas pueden causar repelencia al agua en grados extremos al disminuir la porosidad de los suelos (Bisdorn, 1993).

La repelencia del suelo dependerá en cierta forma de la temperatura alcanzada por el fuego y del tiempo de exposición. Por ejemplo, a 200°C durante 10 minutos, la repelencia puede intensificarse, mientras que a más de 800°C la repelencia al agua desaparece en tan sólo 10 minutos por la destrucción de sustancias hidrofóbicas (DeBano y Krammes, 1966).

Temperatura del incendio	<175°C	175°C-200°C	280°C-400°C
Repelencia al agua	Poca variación de la repelencia	Aumento de la repelencia	Destrucción de la repelencia

Tabla 1.1: Variabilidad de la repelencia en los suelos respecto a las temperaturas alcanzadas (Jaramillo, 2004).

Las condiciones de hidrofobicidad en suelos afectados por incendios se pueden mantener por unos cuantos meses, incluso años, dependiendo de la ubicación geográfica y del tipo de vegetación presente en la zona. (Figura 1.8) (Haigh, 2009).

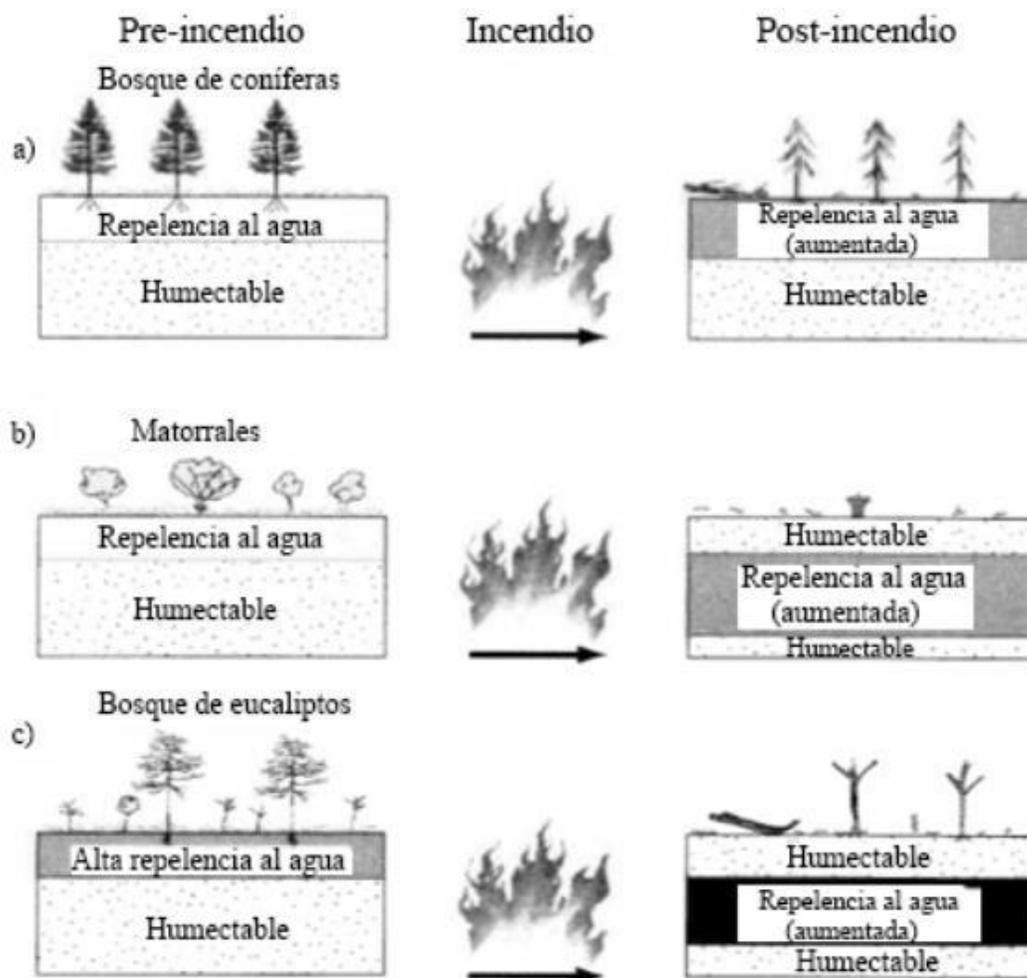


Figura 1.8: Efectos del fuego en la repelencia según la vegetación y la humedad. a) Bosques coníferos en el noroeste de USA; b) Chaparral de California; c) Bosque de eucaliptos australiano. Sombreado gris representa nivel impermeable, sombreado oscuro representa repelencia más severa (Haigh, 2009).

Las altas temperaturas afectan también la distribución del tamaño de las partículas del suelo. En los suelos arenosos, las dimensiones de los granos tienden a disminuir con el aumento de la temperatura debido a la unión de las partículas más finas con los granos de tamaño arena por efecto de las altas temperaturas. Por otra parte, los suelos arcillosos incrementan su tamaño de partículas con el incremento de la temperatura por la agregación y cementación de la fracción arcillosa (Zihms, 2013).

Generalmente, la mineralogía no se ve alterada ya que el primer paso para la destrucción de la mayoría de los minerales, la deshidroxilación (pérdida de grupos OH) ocurre sobre los 500°C (Tan, 1986). Sin embargo, además de la temperatura estos cambios en los distintos componentes del suelo dependen del tiempo de exposición, humedad y de la mineralogía original. Dependiendo de estas variables, pueden existir cambios en las arcillas (caolinita e ilita mayoritariamente) y minerales como la hematita y goethita provocando en el suelo desarrollo de propiedades magnéticas con la aparición de maghemita, un mineral magnético dimorfo de la hematita formado sobre los 600°C. (Kettering y Bigham, 2000).

En cuanto a los límites de plasticidad (o de Atterberg), estos varían dependiendo del tipo de arcilla presente y temperatura a la cual fue expuesto el suelo durante un incendio, y en menor medida por la humedad y contenido orgánico presente. Dado a que algunas arcillas se hinchan en presencia de agua, como la montmorillonita, su respuesta a las altas temperaturas podría ser diferente a las arcillas que no sufren este cambio por la humedad, como la caolinita, y por tanto inducir diferentes cambios tanto en el límite plástico como en el líquido (ya sea aumentar o disminuir su valor) y por ende en su plasticidad (Zihms, 2000); (Tan, 2003).

El efecto del fuego es evidente en una propiedad como el color, en zonas con severidad baja a moderada el suelo es cubierto por una capa negra o gris debido a la carbonización de material orgánico y la presencia de ceniza. Tiende a haber un amarillamiento de los suelos entre temperaturas de 300-600°C y cuando el tiempo de exposición (al menos de 45 minutos) es mayor y el calor sobrepasa los 600°C un enrojecimiento comienza a hacerse presente (Kettering y Bigham, 2000).

Más adelante se analizarán y compararán los cambios en los suelos provocados por la catástrofe incendiaria del verano de 2017 en la zona de estudio y se buscara dar una explicación con ayuda del material bibliográfico aquí recolectado.

2 Metodología.

2.1 Revisión de antecedentes.

Corresponde a la recopilación de información geológica (litológica, estructural, etc) del área de estudio, siendo la principal fuente la Carta Geológica de Chile 1:1.00.000 del Sernageomin. Además, se revisó el catastro de incendios forestales ocurridos en la zona que se encuentran en la base de datos de la Conaf y la Onemi, con el fin de diferenciar incendios anteriores del que se encuentra en estudio.

Mediante el uso de fotografías aéreas se determinó el alcance del fuego, severidad de este último y condiciones de la vegetación pre y post incendio.

2.2 Procesamiento de imágenes satelitales.

Consiste en la manipulación de imágenes, obtenidas por satélite, de la zona de estudio con el fin de buscar áreas de mayor interés para el trabajo en terreno. Para ello se empleó el software ENVI e imágenes Landsat 8, las cuales son obtenidas de internet; específicamente del enlace <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Antes de trabajar las imágenes satelitales, estas requieren frecuentemente que se les apliquen dos calibraciones, las que se realizaron con la ayuda de ENVI, antes de que los datos fueran analizados cuantitativamente. Las calibraciones convierten los números digitales (**DN**), que es la respuesta del instrumento a la luz. La primera calibración elimina el factor del sensor, es decir calibramos la imagen al sensor, transformamos los datos a **radianza**. Y la segunda corresponde a la eliminación de los factores atmosféricos en una imagen, que genera la imagen de **reflectancia** (absoluta o relativa), cuyos datos son comparables a mediciones locales en contacto con los elementos a estudiar. (Figura 2.1)

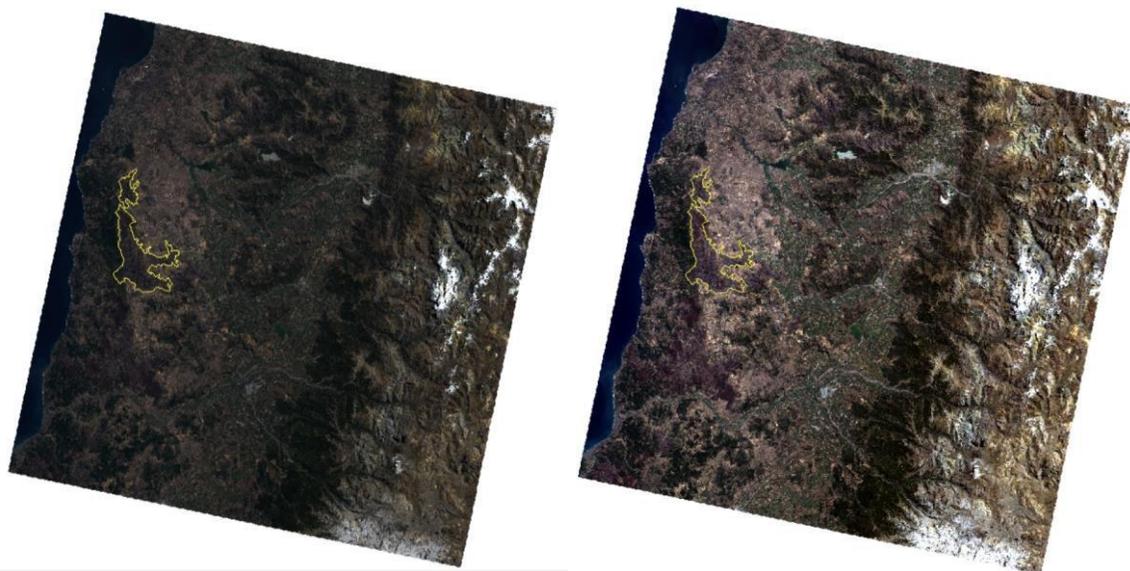
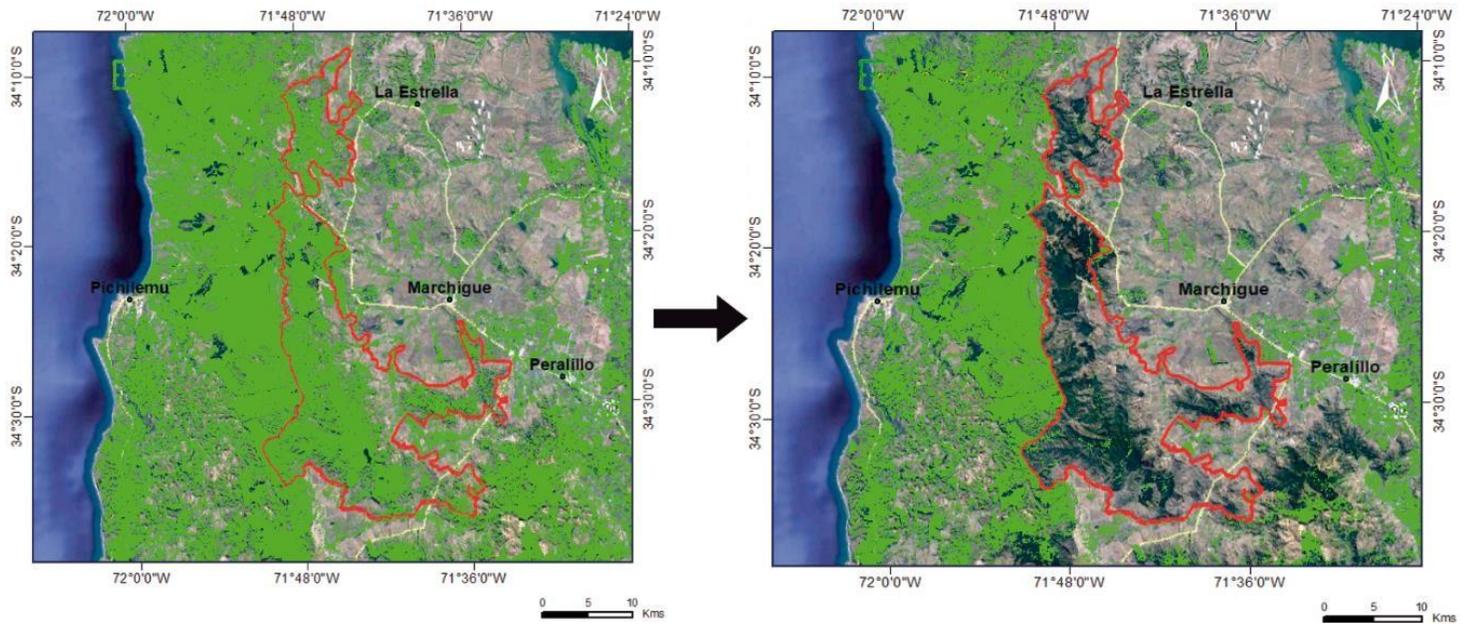


Figura 2.1: Procesamiento de imágenes satelitales. Comparación entre la imagen original de la zona de estudio (delimitada en amarillo), sin correcciones (izquierda), con una a la que se le han aplicado las correcciones (derecha).

Una vez hechas las calibraciones, la nueva imagen se utilizó para hacer un catastro de cuánta fue la vegetación afectada por las llamas. Esto se llevó a cabo con la herramienta NDVI (índice de vegetación) y permitió visualizar los sectores donde el fuego consumió mayor cantidad de bosque y fue una guía para tener una primera idea de qué puntos visitar durante la salida a terreno y del estado actual, junto con la posible recuperación, de los bosques de la zona devastada por la catástrofe incendiaria (Figura 2.2).



Vegetacion 14 de noviembre de 2016 Vegetacion 6 de marzo de 2017
 Figura 2.2: Evolución de la vegetación (Verde claro), según fechas, en áreas circundantes a la zona de interés (delimitada en rojo).

Toda la información fue procesada posteriormente en el programa Argis, donde se reunieron varios shapes con información de la geología, geomorfología y datos del incendio mismo (como severidad) (Figura 2.3) (Conaf, 2017).

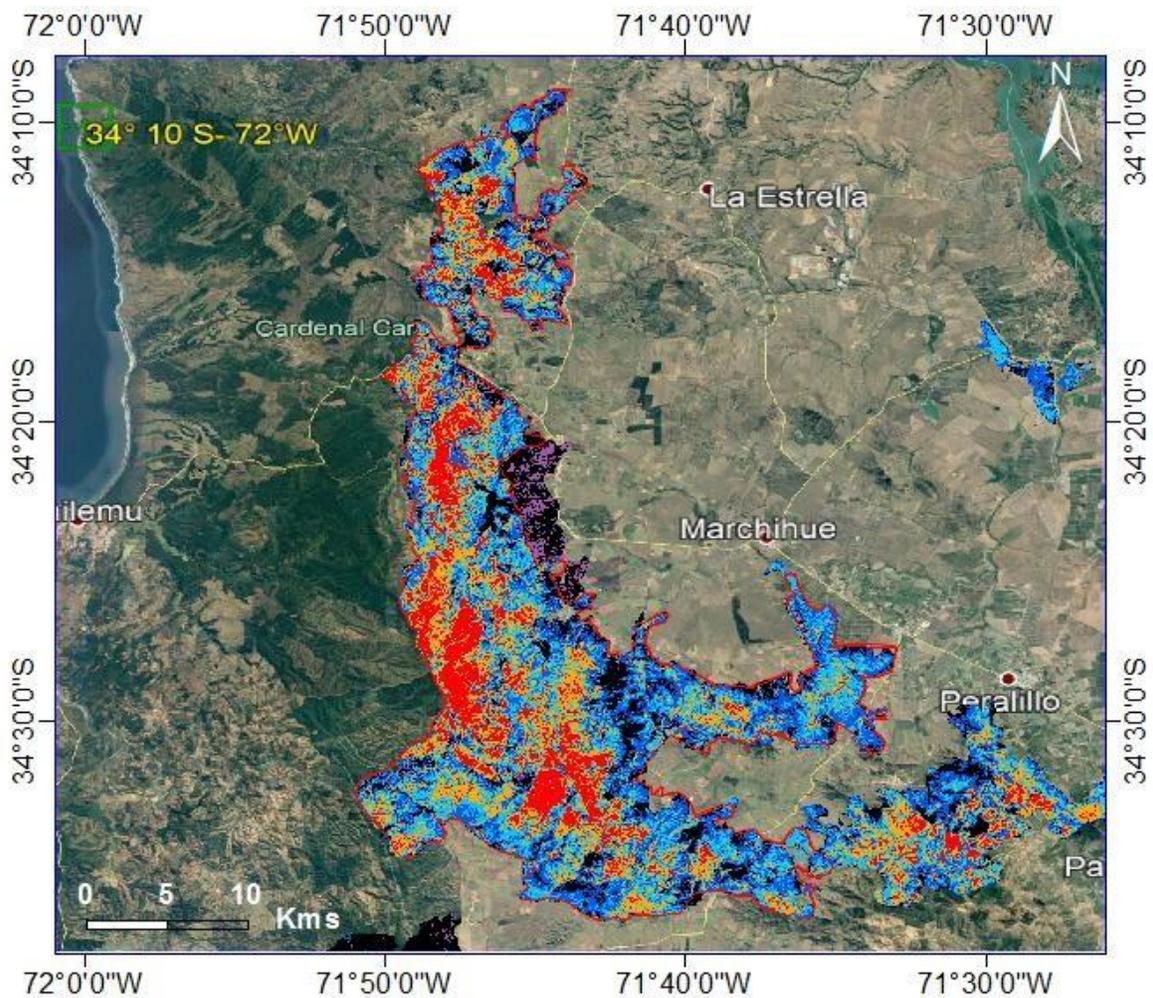


Figura 2.3: Zona incendiada entre los meses de enero y febrero del 2017 donde se divide el terreno en 3 sectores según la severidad del fuego: rojo (severidad alta), naranja (severidad intermedia), azul-celeste (severidad baja) y el color negro es una zona que no se vio afectada por las llamas pero que tuvo bajo crecimiento de vegetación post incendio (Modificado de Conaf, 2017).

Esto último permitió definir los puntos a visitar en la campaña de terreno, con la finalidad de obtener muestras de suelos con diferentes grados de daño ocasionado por las temperaturas alcanzadas por las llamas. Gracias a los análisis de fotografías aéreas es que se establecieron 4 sitios de extracción, divididos por el nivel de destrucción ocasionado: severidad alta, media y baja más un espacio cercano al siniestro pero que no fue afectado directamente por él.

2.3 Campaña de terreno.

Consistió en 3 visitas por el día. En la que se obtuvieron muestras de los suelos, para ser ensayados, y se llevaron a cabo también análisis de permeabilidad in-situ.

Dado que el efecto del fuego no es el mismo en superficie y en profundidad. Es que en los puntos de extracción (ver Figura 2.4) se retiró dos muestras por parada, una en superficie y otra a una profundidad de 15-20 cm aproximadamente, lo que dio como resultado final un total de 8 muestras de suelo para el estudio y posterior análisis en laboratorio.

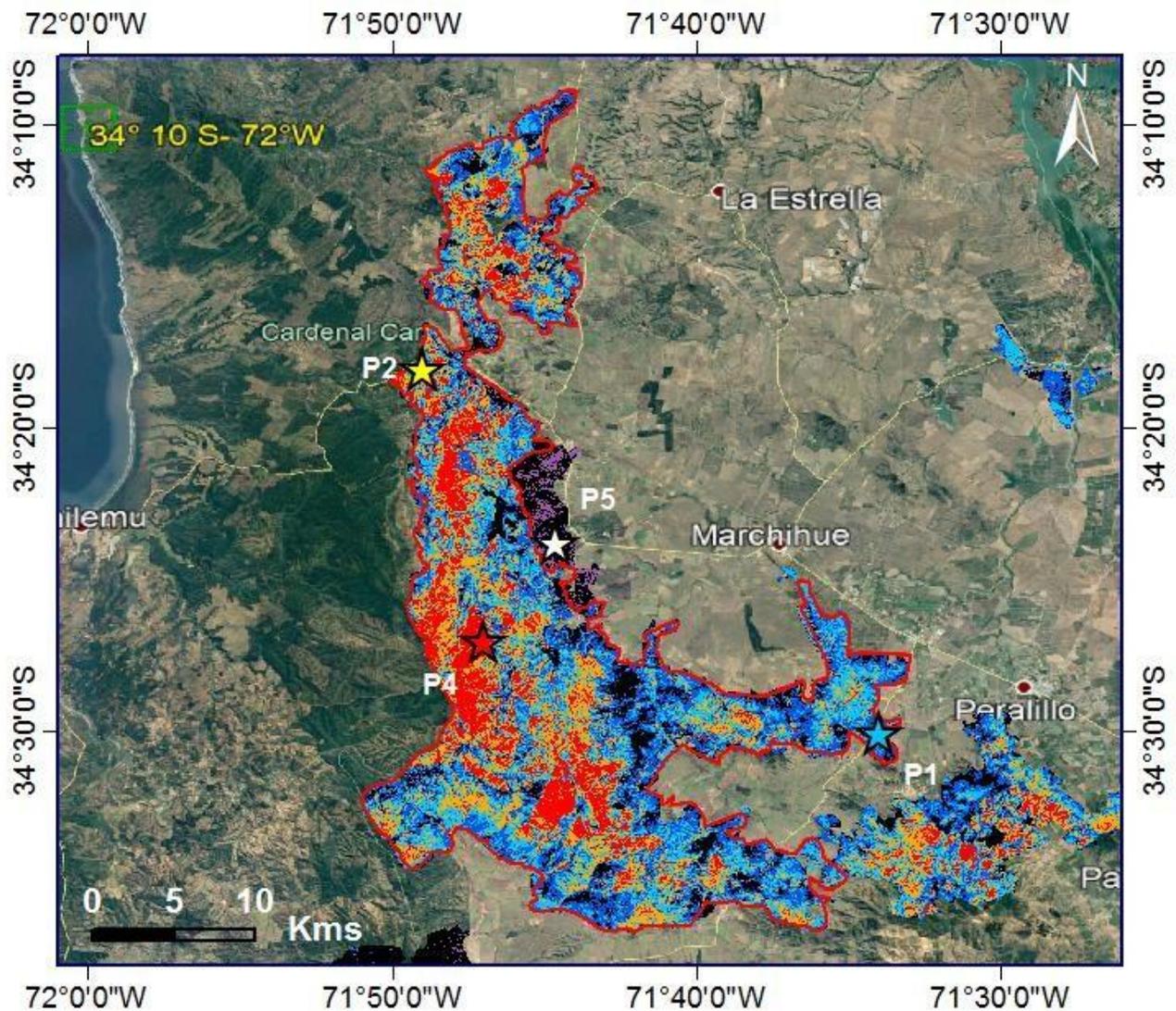


Figura 2.4: Puntos de muestreo de la zona de estudio. Las estrellas señalan los puntos de análisis de permeabilidad y extracción de suelos, en rojo la severidad alta (P4), en amarillo la severidad intermedia (P2), en celeste la severidad baja (P1) y, finalmente, en blanco la muestra testigo (P5) que no fue afectado por el incendio de 2017

2.3.1 Análisis geotécnico

Una vez en terreno, se realizó un reconocimiento geotécnico en los puntos de interés y para ello se confeccionaron calicatas. Las calicatas son excavaciones de profundidad pequeña a media, que en este caso fueron realizadas con una pala, y que permiten la inspección directa del suelo que se desea estudiar y, por lo tanto, es el método de exploración que normalmente entrega la información más confiable y completa (Figura 2.5) (Geoseismic, 2017).



Figura 2.5: Ilustración de una calicata en terreno, de unos 20 cm de profundidad aproximadamente.

Una vez hecha la descripción de suelos, se calculó la permeabilidad en cada punto de muestreo a unos 20 cm de profundidad aproximadamente, con la finalidad de detectar posibles cambios que el fuego haya podido producir en esta variable. Se utilizó la misma calicata fabricada anteriormente y se rellenó con agua, para saturar el suelo, y se procedió a tomar mediciones del nivel de agua después de 20 min para finalmente agregar agua nuevamente. Esto se llevaba a cabo hasta que se obtenía tres veces la misma medición (Fao, sf) (Figura 2.6).



Figura 2.6: Ensayo de permeabilidad llevado a cabo en terreno. La idea era saturar el suelo de agua, una vez hecho esto, se medía cuánto había descendido el nivel del líquido (foto derecha) en un tiempo de 20 min y se volvía a rellenar con agua y se repetía el proceso hasta obtener la misma medición 3 veces.

Con la ayuda de la Ecuación 1 fue posible calcular el coeficiente de permeabilidad para los distintos suelos, ya que todas las demás variables eran conocidas:

$$K = \frac{V * L}{H * A * t} \quad (1)$$

- K=Coeficiente de permeabilidad.
- L= Longitud de la calicata.
- H= Altura promedio del inicio de la excavación al final de la columna de agua.
- A= Área o sección transversal de la calicata.
- T= tiempo ensayo.
- V= Volumen

2.4 Trabajo de laboratorio.

2.4.1 Descripción macroscópica de muestras: Lupa binocular.

La lupa binocular es un instrumento óptico que permite ver una imagen aumentada del objeto (en nuestro caso muestras de suelo) que se observe a través de ella, además de dar la facilidad de tener una vista en relieve, visión estereoscópica, del elemento que se está analizando (Tomás, s.f).

El procedimiento de análisis fue bastante simple, se colocó una cierta cantidad de muestra en un platillo de vidrio y se situó bajo el objetivo para poder realizar las descripciones. Estas últimas abarcaron color, tamaño y forma de grano, diferenciación de minerales. Además, permitió conseguir fotografías con aumentos de los suelos estudiados.

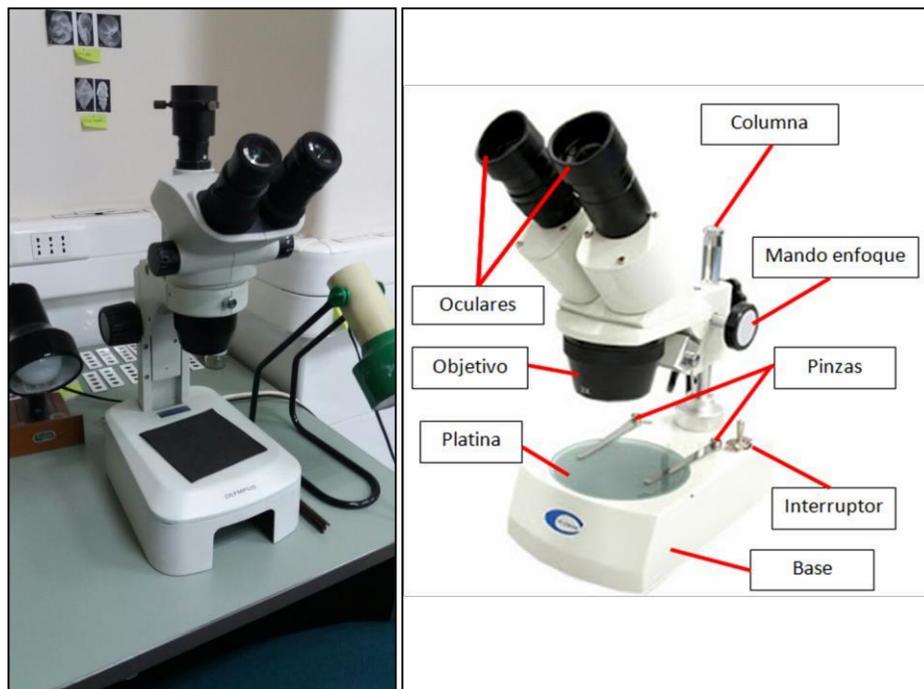


Figura 2.7: Lupa binocular utilizada, localizada en el laboratorio de sedimentología de la Universidad de Chile, en la investigación (izquierda) con sus respectivas partes (derecha)

2.4.2 Espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR).

Preparación muestras.

Para trabajar con espectroscopia de infrarrojos se necesitó una gama de materiales para preparar las muestras (Figura 2.8).

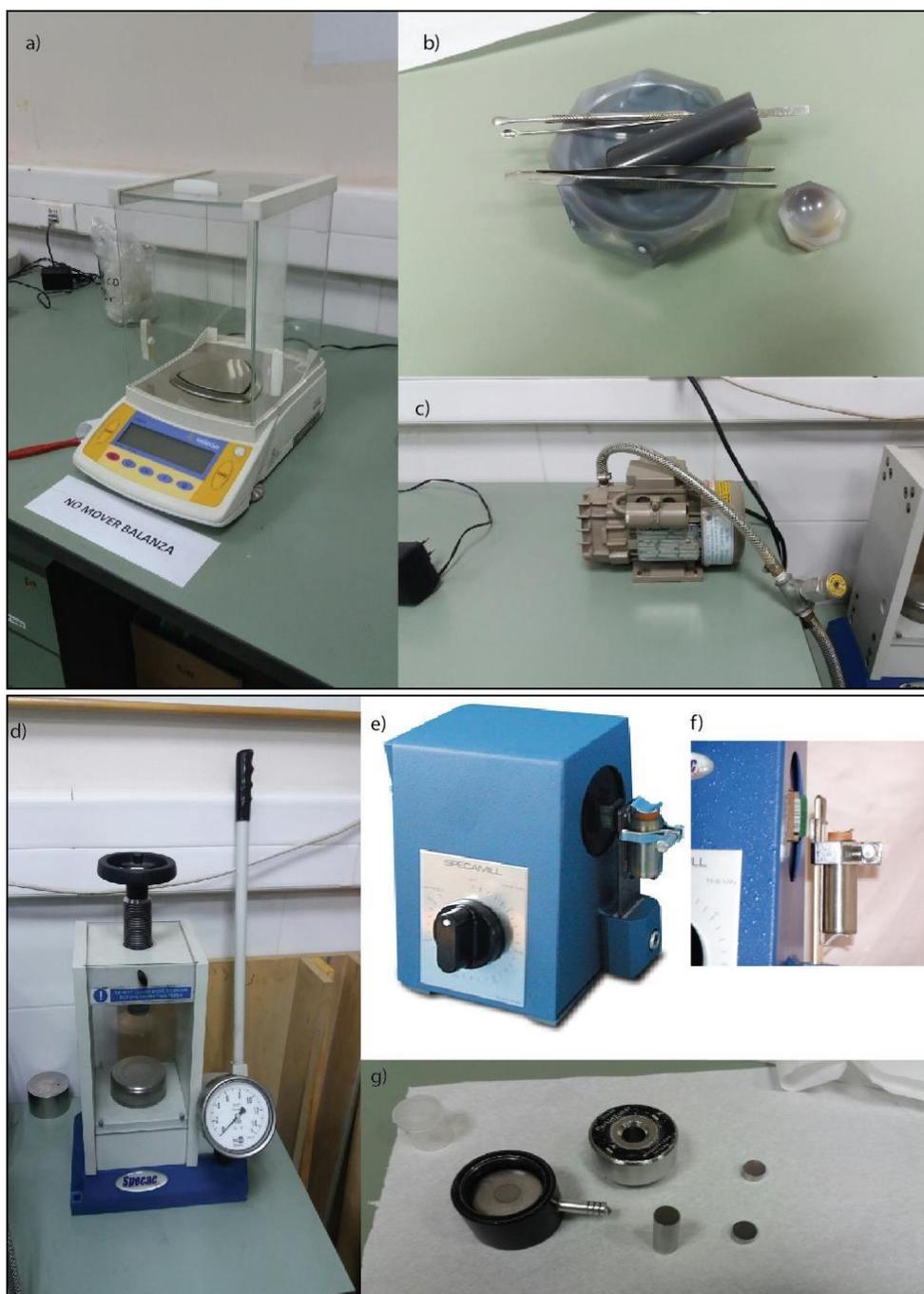


Figura 2.8: Materiales utilizados en la preparación de muestras para FTIR. a) Balanza. b) Morteros de ágatas en diferentes tamaños, c) Bomba para vacío, d) Prensa hidráulica Specac, e) Specamill, f) Cápsula del Specamill y g) Prensador Perkin Elmer (desarmado) más horno pequeño, vidrios parabólicos, refrigerador y desecador.

Las ocho muestras de suelo extraídas, superficiales y en profundidad, en terreno fueron arduamente trabajados antes de aplicar el FTIR:

- a) Se tamizó la muestra original por la malla 200 (0,0737 mm) y pesó 0,03 gr de la muestra que atravesó el tamiz.
- b) Se molió manualmente la muestra de polvo en un mortero de ágata hasta obtener una muestra homogenizada.
- c) Se puso 10 a 20 mg de polvo de la muestra en el mortero cilíndrico del Specamill (las esferas de ágata del molino deben ir antes que el polvo).
- d) Se agregó acetona en el mortero cilíndrico (Hasta 2/3 partes del llenado total) para luego tapar fuertemente el cilindro.
- e) Se colocó el mortero cilíndrico en el Specamill. El cual debió funcionar a temperatura baja (para ello se coloca en un refrigerador) para evitar accidentes con la acetona.
- f) La muestra se mantuvo agitada 2,5 horas en el Specamill con la finalidad de obtener partículas con tamaño promedio menor a 2 μm .
- g) Se recuperó la mezcla (muestra + acetona) del mortero cilíndrico en un vidrio parabólico. Se esperó que la acetona se evaporara con la temperatura ambiente para así obtener la muestra original. (Figura 2.9 a))
- h) Posteriormente se pesó 0,0025 gr de la muestra y se colocó en el mortero de ágata más pequeño.
- i) Se agregó bromuro de potasio (KBr), previamente almacenado en el desecador, a la muestra en el mortero hasta obtener un 1 gr de mezcla
- j) La mezcla de volvió a moler, para homogeneizar, por 10-15 minutos.
- k) Se separaron 300 mg de la muestra en un vidrio parabólico. (Figura 2.9 b))
- l) La mezcla se colocó en el horno a 110°C por un mínimo de dos horas.
- m) Se puso la mezcla separada en el prensador Perkin Elmer, entre las caras lisas de las pastillas de metal (la muestra debe estar caliente).
- n) Se aplicó vacío de 0,5 bares en el prensador por 30 min.
- o) Luego el prensador se colocó en la prensa Specac y se le aplicó presión lenta hasta alcanzar las 10 toneladas, con la bomba de vacío funcionando.
- p) Finalmente, se sacaron las pastillas del prensador y se volvieron a colocar en el horno a 110°C por 24 horas. (Figura 2.9 c)).

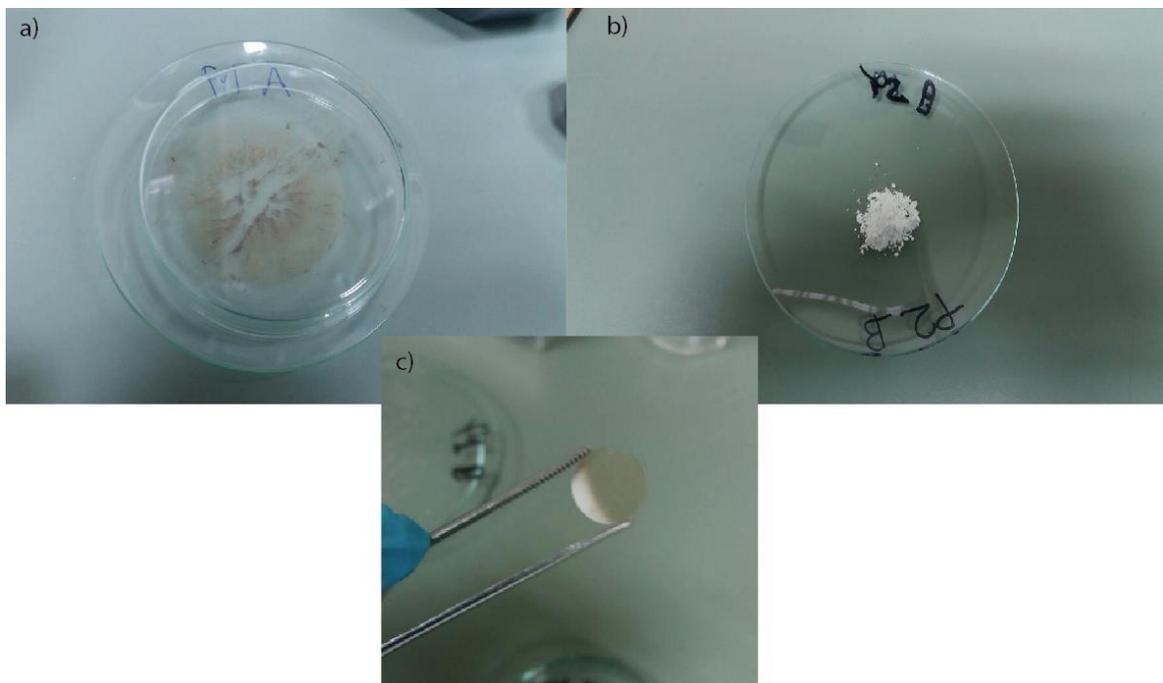


Figura 2.9: Preparación de las muestras para FTIR. a) Muestra original recuperada después de usar el Specacmill, b) 300 mg de muestra + KBr., c) Pastilla de la muestra que será utilizada en el FTIR.

Aplicación del FTIR en las muestras.

Una vez obtenidas las pastillas fue posible emplear la espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), la cual es una técnica usada para obtener el espectro infrarrojo de absorción o emisión de un sólido, líquido o gas. Cuando la radiación infrarroja (IR) pasa a través de una muestra, parte de dicha radiación es absorbida mientras que el resto pasa a través de la muestra (es transmitida). La señal resultante en el detector es un espectro, que es algo como la "huella digital", de los componentes que están presentes en la muestra analizada. La utilidad de este método radica en que cada molécula (o estructura química) posee su propio espectro (Griffiths y De Haseth, 2007).

El FTIR usa la interferometría, técnicas que consisten en combinar la luz con el propósito de lograr una imagen de mayor resolución aplicando el principio de superposición, para obtener información de la composición, en este caso mineralógica, del material que es expuesto al haz de infrarrojos en la que la transformada de Fourier da como resultado un espectro interpretable (Figura 2.10).

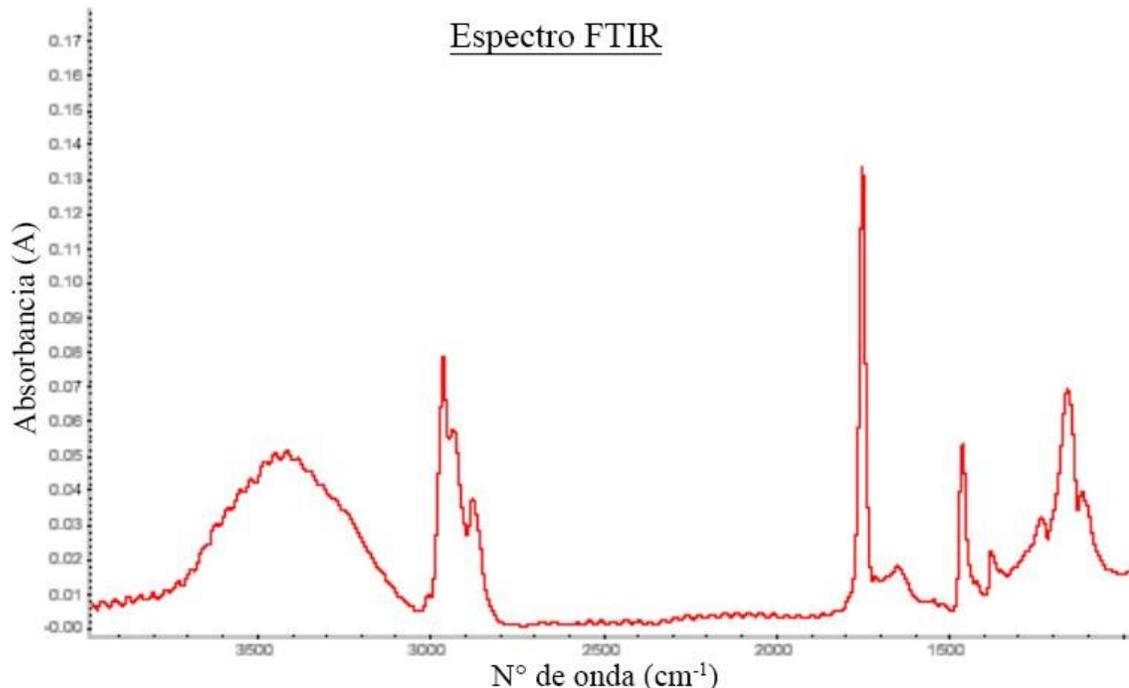


Figura 2.10: Ejemplo de espectro obtenido con FTIR. (ThermoFisher Scientific, sf.)

En este estudio el FTIR se empleó con la finalidad de diferenciar las distintas arcillas de cada muestreo para posteriormente realizar las comparaciones pertinentes y corroborar la recristalización de minerales en los suelos afectados por las llamas.

Interpretación de espectros.

Hechos los espectros era necesario llevar a cabo las interpretaciones de rigor para tener una noción de las proporciones de cada mineral presentes en cada muestra de suelo.

Para ello se emplearon los programas Spectra, Matlab 6.5 y Excel. El primero tenía la finalidad de construir los gráficos Absorbancia vs Nº de onda (cm⁻¹) (Ver Figura 2.11) y conocer los valores numéricos de cada peak de la onda. Matlab permitía la identificación de algunos de los minerales presentes asignándoles un valor numérico, no un porcentaje, dependiendo de la abundancia o escases de éste (Figura 2.12). Por último, Excel transformaba el valor dado por Matlab en un porcentaje, y además se utilizó para crear los gráficos de minerales de cada muestra, lo que facilitaba las deducciones posteriores.

El espectro del resto de las muestras se encuentra adjunto en Anexos E.

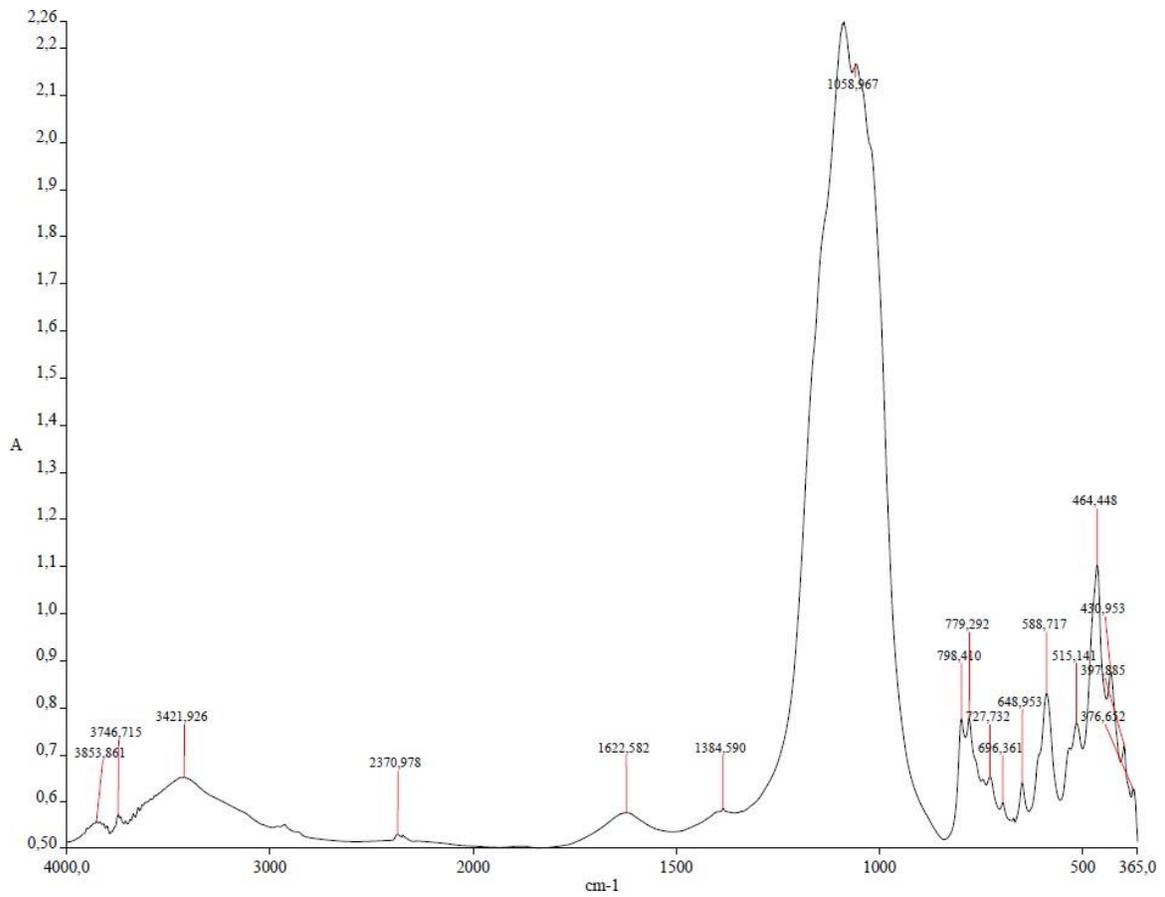
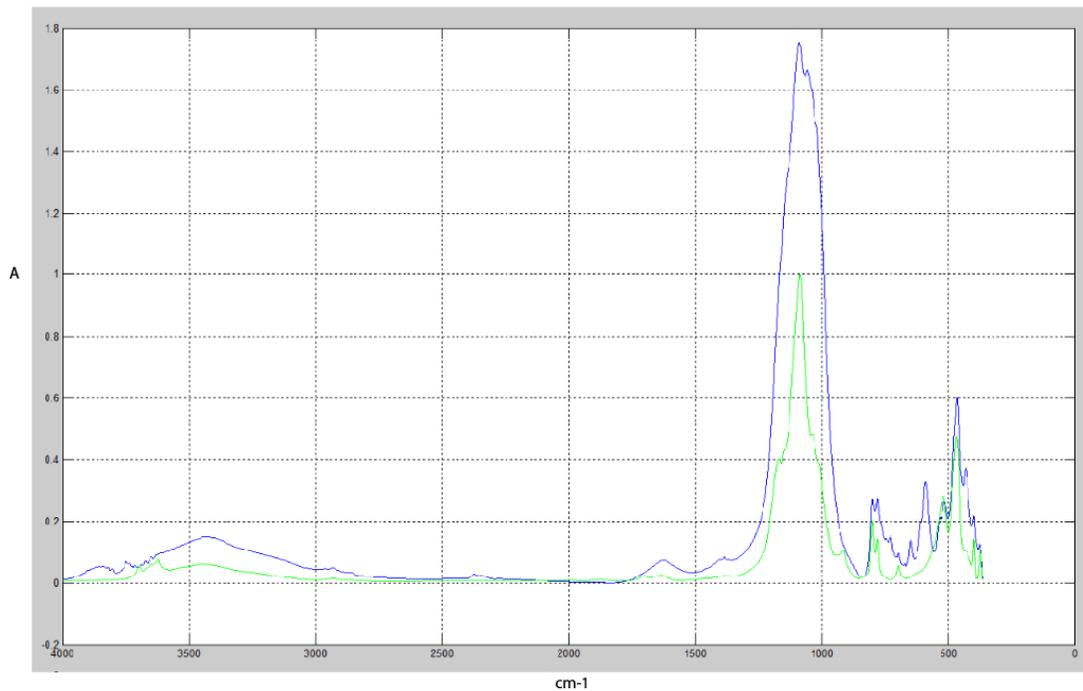


Figura 2.11: Gráfico Absorbancia (A) vs N° de onda (cm⁻¹) de la muestra P1-A (severidad baja) confeccionado con Spectra donde cada peak tiene asociado su valor numérico para poder llevar a cabo las interpretaciones minerales.



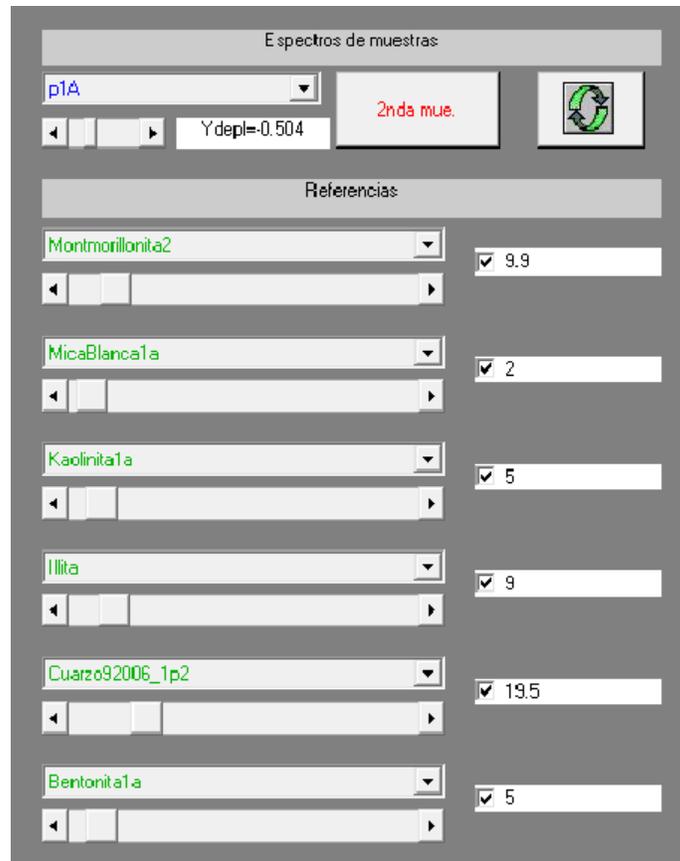


Figura 2.12: Identificación mineral con Matlab 6.5: La finalidad era tratar de igualar el espectro de la muestra (en azul) con el nuevo espectro (verde) haciendo variar los valores numéricos de cada mineral.

2.4.3 Límites de Atterberg.

El análisis y procedimientos de límites de Atterberg están basados en la norma ASTM (sf). Una vez obtenidas las muestras de terreno, de suelo quemado y no quemado, se llevó a cabo un análisis de consistencia y plasticidad de suelos para corroborar posibles diferencias entre suelo pre y post incendio. Para lo cual se calcularon los límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg (Figura 2.13), o límites de plasticidad, permiten calcular el intervalo de humedad para el cual un suelo se comporta o mantiene en estado plástico. Dichos límites se basan en la idea de que en un suelo fino pueden existir cuatro grados de consistencia según su grado de humedad, de esta manera un suelo sin la presencia de agua se encuentra en estado sólido y a medida que se le va añadiendo humedad va pasando sucesivamente a los estados semisólido, plástico y por último líquido (Lambe, 1999).

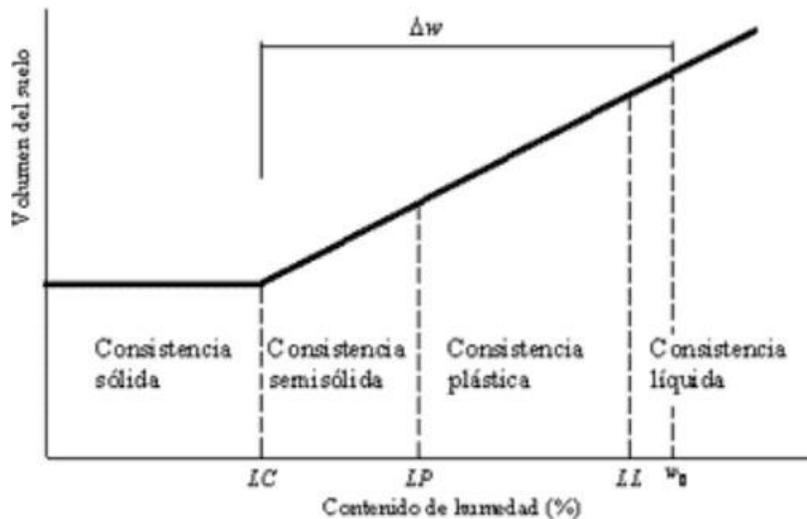


Figura 2.13: Límites de Atterberg. El gráfico ilustra la variación de del volumen respecto al contenido de humedad. (Límites de Atterberg: Contracción, sf.).

Los ensayos que se realizaron en el laboratorio midieron la cohesión del terreno y su contenido de humedad. Es con esto que se definen tres límites, aunque para efectos de este trabajo solo nos interesan los dos primeros:

1. **Límite líquido (LL):** cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande (Lambe, 1999).
2. **Límite plástico (Lp):** cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico (Lambe, 1999).
3. **Límite de retracción o contracción (Lc):** cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y se contrae al perder humedad (Lambe, 1999).

Relacionado con estos límites es que entra el concepto de:

- **Índice de plasticidad (I_p):** define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico (Lambe, 1999). La Ecuación 2 ilustra como calcularla matemáticamente:

$$I_p = LL - LP \quad (2)$$

Un Índice de plasticidad bajo, como por ejemplo del 5%, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, como por ejemplo del 20%, indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido se le debe agregar gran cantidad de agua (Límites de Atterberg: Contracción, sf).

Preparación de muestras.

Se empleó únicamente la parte de suelo que pasó por la malla #40 (0,42 mm). Se procedió a agregar y/o retirar agua según fuera necesario para luego revolver la muestra hasta obtener una pasta semi-líquida homogénea en términos de humedad.

Ya que todos los suelos extraídos correspondían a mezclas entre limos y arcillas, después de haber batido las muestras, se pusieron a reposar en recipientes cubiertos por alrededor de 15 horas con la finalidad de asegurar una humedad uniforme.

Determinación límite líquido por método de Casagrande.

El límite líquido se determinó de acuerdo con que el suelo remoldeado, aquel suelo cuya humedad correspondía al límite líquido, poseía una pequeña resistencia al corte (aproximadamente $0,02 \text{ kg/cm}^2$) de tal modo que la muestra de suelo remoldeado necesitaría 25 golpes para cerrar en $\frac{1}{2}$ pulgada (1,27 cm) dos secciones de una pasta de suelo de dimensiones especificadas más adelante.

- 1) Previo al experimento fue necesario preparar una pasta de suelo en la cápsula de porcelana con una humedad ligeramente superior al límite líquido.
- 2) Se desmontó y secó la cápsula de la máquina de Casagrande (Figura 2.15), asegurándose que se encontrara perfectamente limpia y seca antes de iniciar el procedimiento.
- 3) Se montó la cápsula en su posición para el ensayo.
- 4) Se colocó entre 50 y 70 gr de suelo húmedo en la cápsula, alisando la superficie a una altura de 1 cm con la espátula, cuidando de no dejar burbujas de aire en la masa de suelo.
- 5) Se usó el acanalador para separar el suelo en dos mitades según el eje de simetría de la cápsula; para el caso de las arcillas, el surco se puede hacer de una vez; los limos pueden exigir 2 o 3 pasadas suaves antes de completarlo, siendo este procedimiento aún más complejo cuando se trataba de suelos orgánicos con raíces.
- 6) Se giró la manivela de manera uniforme a una velocidad de 2 revoluciones/seg; se continuó hasta que el surco se cerraba en $\frac{1}{2}$ pulgada de longitud; se tomó nota cuando el número de golpes cuando era inferior a 40.
- 7) Se revolvió el suelo en la cápsula de Casagrande con la espátula y repitió las operaciones 5) y 6).
- 8) Se tomó una muestra de aproximadamente 5 gr de suelo en la zona donde se cerró el surco y se procedió a pesarla de inmediato para obtener su contenido de humedad, lo que permitió obtener un punto en el gráfico semi-logarítmico de humedad v/s número de golpes que se describe más adelante.
- 9) Se vació el suelo de la cápsula de Casagrande a la de porcelana (que todavía contiene la mezcla de suelo inicial), se continuó revolviendo el suelo con la espátula (durante el cual el suelo pierde humedad) y en seguida se procedió a repetir las etapas (2) a (8).



Figura 2.15: Máquina de Casagrande empleada para determinar el límite líquido.

Calculo del límite líquido (LL).

Sobre un papel semi-logarítmico se construyó la “curva de flujo” como se indica en la Figura 2.16. Los puntos obtenidos tienden a alinearse sobre una recta lo que permitió interpolar para la determinación de la ordenada w_L para la abscisa $N=25$ golpes.

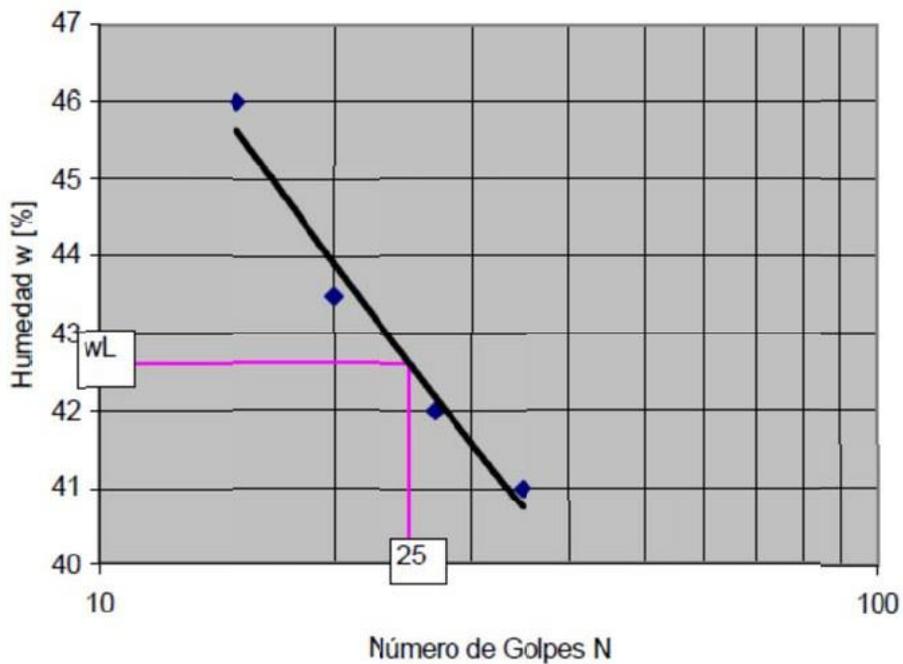


Figura 2.16: Curva de flujo. Calculo del límite líquido (L_L) (Lambe, 1951).

Determinación del límite plástico (L_p).

El límite plástico es el contenido de humedad para el cual el suelo se fractura al ser amasado en bastoncitos de diámetro de 3 mm (Figura 2.17), en trozos de 0,5 a 1 cm de largo, cuando se amasa una pequeña porción de suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa.

- 1) Se utilizó una porción del material que quedó del ensayo del límite líquido.
- 2) Para evitar excesivas demoras en el ensayo con los suelos muy plásticos, fue necesario secar el material al aire durante un cierto tiempo extendiéndolo sobre una placa de vidrio.
- 3) Se tomó una bolita de 1 cm^3 y amasó sobre el vidrio con la palma de la mano hasta formar bastoncitos de 3 mm de diámetro.
- 4) Se reconstruyó la bolita de suelo, uniendo el material con fuerte presión a de las puntas de los dedos y amasó nuevamente un bastoncito hasta llegar al límite plástico.
- 5) Se pesó inmediatamente el bastoncito así formado para determinar su contenido de humedad.
- 6) Se realizaron 2 ensayos por muestras repitiendo las etapas (3) a (5) y promedio las humedades obtenidas.

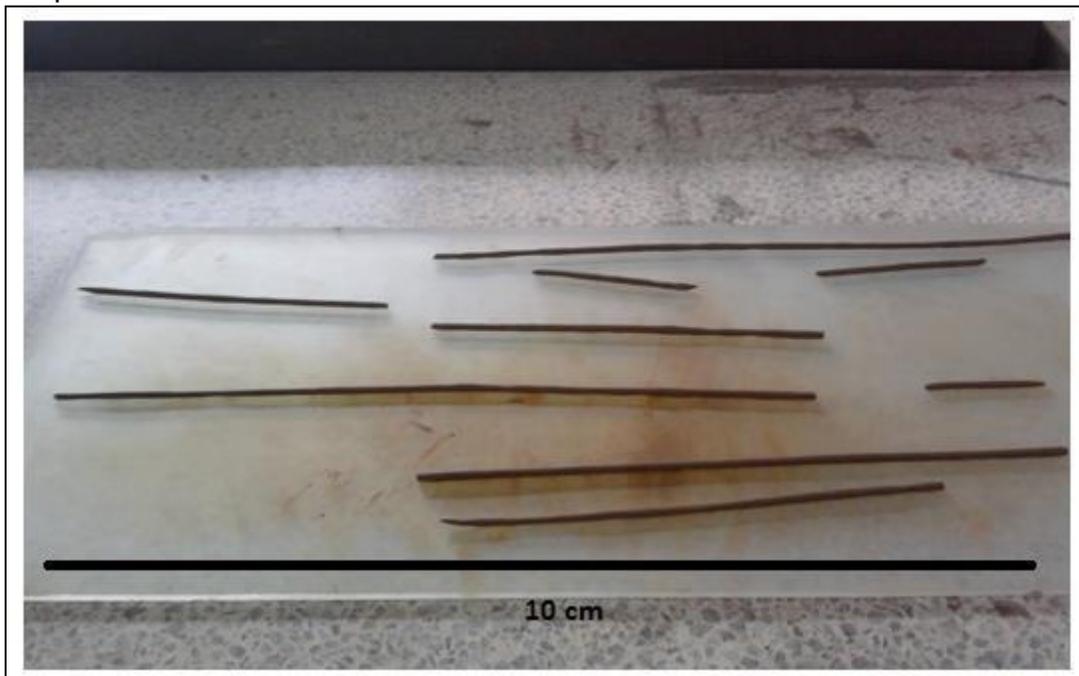


Figura 2.17: Bastoncitos formados para determinar el límite plástico de las muestras de suelo quemado y no quemado.

2.4.4 Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico de suelo está basado en la norma ASTM (sf). Consiste en determinar la proporción relativa en peso de los diferentes tamaños de granos de las muestras obtenidas de terreno con el fin de verificar cambios de dimensiones entre suelos quemados y no quemados.

Para ello se utilizó la técnica de tamizaje, que consiste en hacer pasar el material por una serie de tamices (Figura 2.18) de abertura de tamaños descendentes por medio de movimientos normalizados, pesar lo retenido en cada tamiz y expresarlo en porcentajes del peso total de la muestra seca.

Las mallas usadas para el ensayo fueron las siguientes:

US Malla	Tamaño (mm)
4	4,75
8	2,36
10	2
30	0,6
40	0,425
50	0,3
100	0,150
200	0,075

Tabla 2.1: Malla estandarizadas norma ASTM con su respectiva conversión a mm.



Figura 2.18: Mallas utilizadas para análisis de tamaño de partículas por la técnica del tamizado.

Los resultados de este análisis se expresaron en forma de gráfico semilogarítmico denominado “curva granulométrica” (Figura 2.19), cuya forma nos indica la relación entre los tamaños. Una curva empinada correspondía a un suelo uniforme mientras que una curva suave indicaba un suelo bien graduado. Una inflexión en la curva era señal de que el suelo está compuesto de dos suelos uniformes y es una graduación discontinua o incompleta.

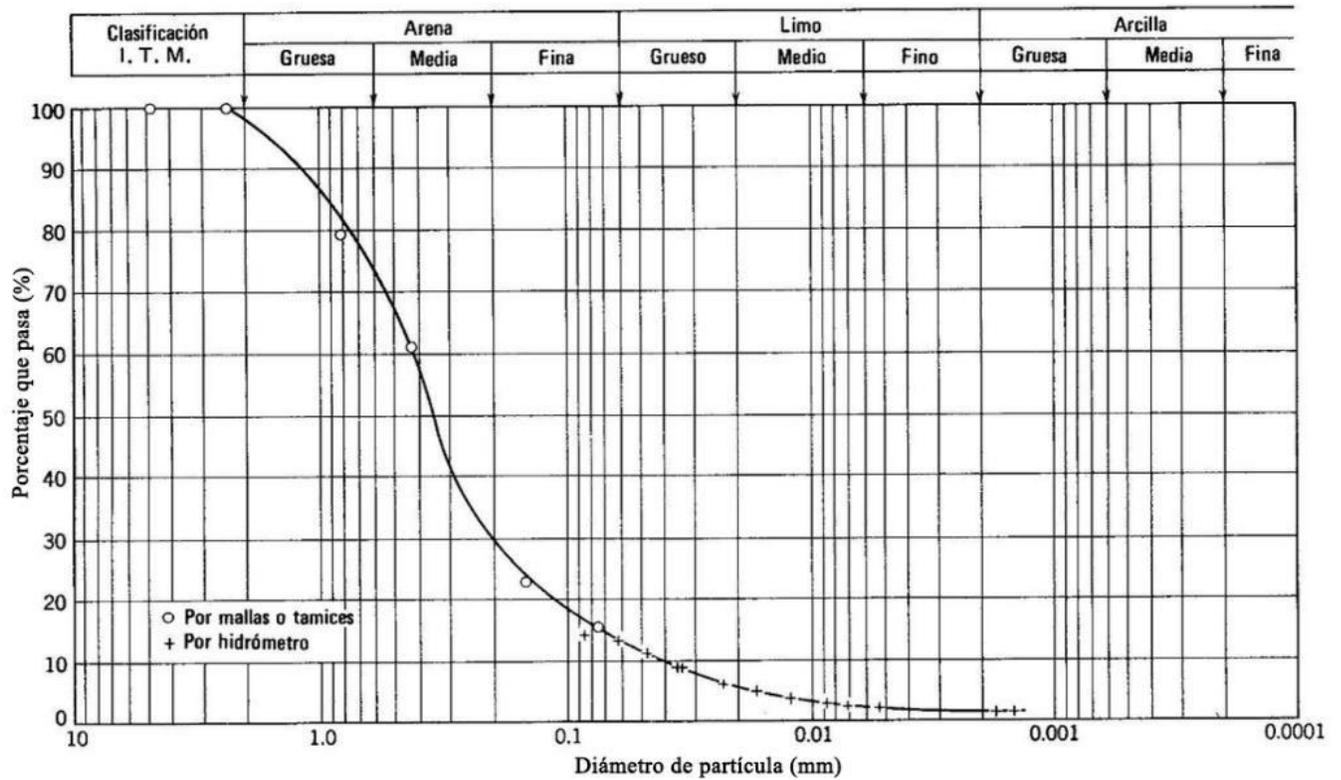


Figura 2.19: Ejemplo de curva granulométrica. En el eje de las abscisas se indican los diámetros de las partículas mientras que en el eje de las ordenadas el porcentaje en peso que pasa (Lambe, 1951).

2.5 Consistencia de agregados.

En primer lugar, es de suma importancia entender el concepto de consistencia. La consistencia del suelo es la firmeza con que se unen los materiales que lo componen o la resistencia de los suelos a la deformación y la ruptura donde se aplica a muestras de suelo mojado (se conoce como adhesividad y plasticidad) húmedo y seco (FAO, s.f). En este análisis, las muestras someras fueron tratadas como suelos secos mientras que las muestras en profundidad como suelo húmedo.

Se trata de un ensayo de campo simple que consistió en tratar de desmenuzar una pequeña cantidad de suelo (húmedo o seco dependiendo del caso) presionándolo entre el pulgar y el índice o apretándolo en la palma de la mano (Figura 2.20) (Fao, sf).



Figura 2.20: Análisis de consistencia de agregados de suelo, en la imagen se puede apreciar cómo se trata de desmenuzar el suelo entre los dedos índice y pulgar.

2.5.1 Determinación de la consistencia del suelo húmedo.

Para el caso de suelos húmedos (muestras en profundidad para este estudio) el suelo se calificó de la manera siguiente (FAO, sf):

- Suelto: Si el suelo no tenía coherencia (estructura de grano suelto).
- Muy friable: Si el suelo se desmenuzaba fácilmente bajo muy ligera presión, pero se unía cuando se les comprime nuevamente.
- Friable: Si el suelo se desmenuzaba fácilmente bajo una presión de ligera a moderada.
- Firme: Si el suelo se desmenuzaba bajo una presión moderada, pero se notaba resistencia.
- Muy firme: Si el suelo se desmenuzaba bajo fuerte presión, pero apenas era desmenuzable entre el pulgar y el índice.
- Extremadamente firme: Si el suelo se desmenuzaba solamente bajo una presión muy fuerte, no se podía desmenuzar entre el pulgar y el índice, y se debía romper pedazo a pedazo.

2.5.2 Determinación de la consistencia del suelo seco.

Para el caso de suelos secos (muestras en superficie para este estudio) el suelo se calificó de la manera siguiente (FAO, sf):

- Suelto: Si el suelo no tenía coherencia (estructura de grano suelto).
- Blando: Si el suelo tenía débil coherencia, se deshacía en polvo o granos sueltos bajo muy ligera presión.
- Ligeramente duro: Si el suelo resistía una presión ligera, pero se podía romper fácilmente entre el pulgar y el índice.
- Duro: Si el suelo resistía una presión moderada, apenas se rompía entre el pulgar y el índice, pero se podía romper en las manos sin dificultad.
- Muy duro: Si el suelo resistía una gran presión, no se rompía entre el pulgar y el índice, pero se podía romper en las manos con dificultad.
- Extremadamente duro: Si el suelo resistía una presión extrema y no se podía romper en las manos.

2.5.3 Magnetismo.

Dado que el magnetismo son los fenómenos atractivos y repulsivos por los imanes (Fowler, sf) y dado que según datos bibliográficos está la opción de aparición de minerales magnéticos debido al incendio es que se pasó por todas las muestras un imán con la finalidad de ver la cantidad de clastos que se adherían a este.



Figura 2.21: Aplicación de un imán sobre las muestras de suelo.

3 Geología

3.1 Marco geológico.

El sector en estudio se encuentra íntegramente en la unidad morfoestructural de la Cordillera de la Costa (ver Figura 3.1), la que corresponde a una cadena continua de cerros de altura reducida (no supera los 600 m s.n.m) de dirección nortesur.

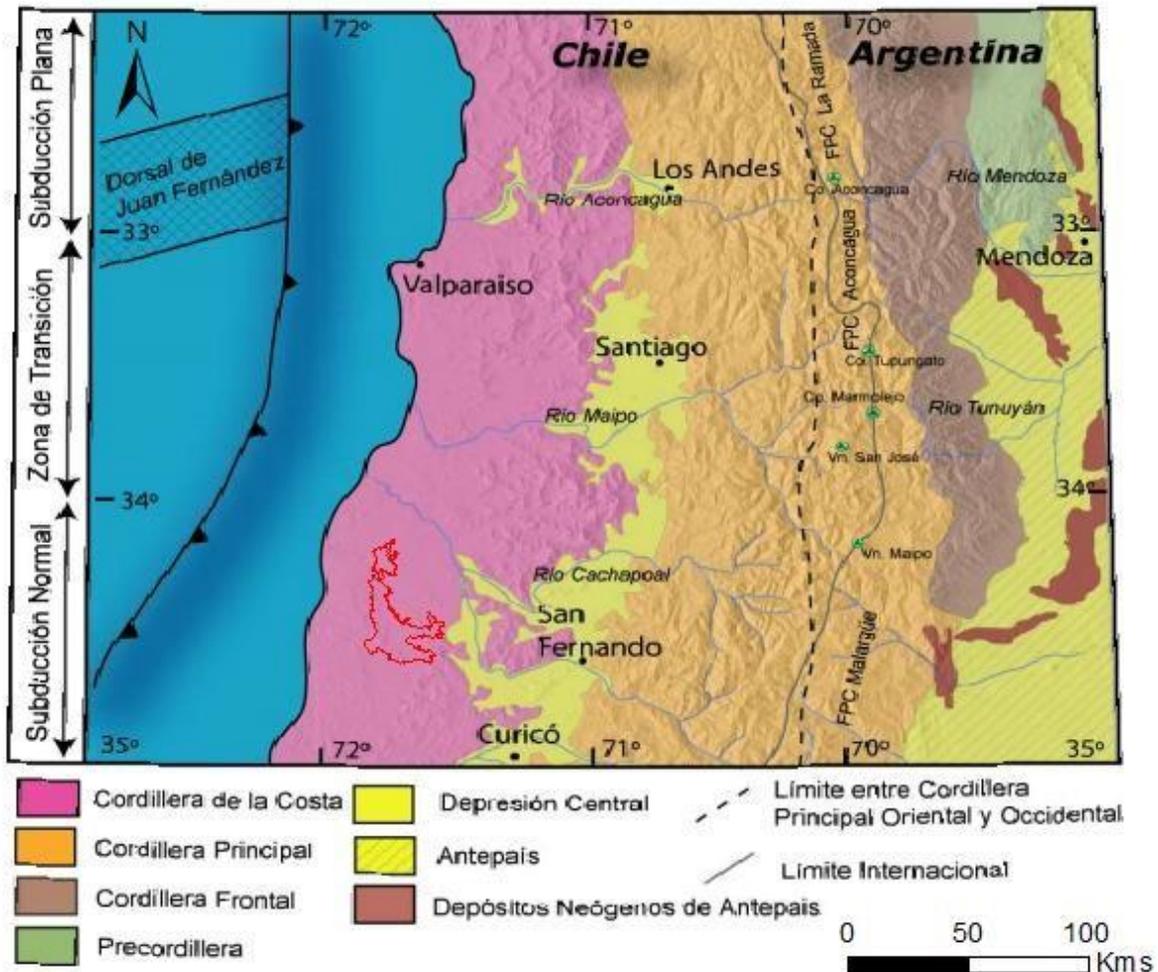


Figura 3.1: Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35° S (Charrier y Muñoz, 1994); (Giambiagi, 2001); (Giambiagi, 2003); (Tassara y Yáñez, 2003). En rojo se puede apreciar la delimitación de este estudio.

El área de estudio se ubica en el límite de las provincias de Cachapoal y Cardenal Caro, en la región de O'Higgins. La geología de la zona se basa en la carta geológica de Chile 1:1.000.000 (Figura 3.2). Es importante recalcar que los afloramientos de las unidades descritas son muy pobres debido a la abundante vegetación y al grosor de la capa de suelo (Farias, 2011).

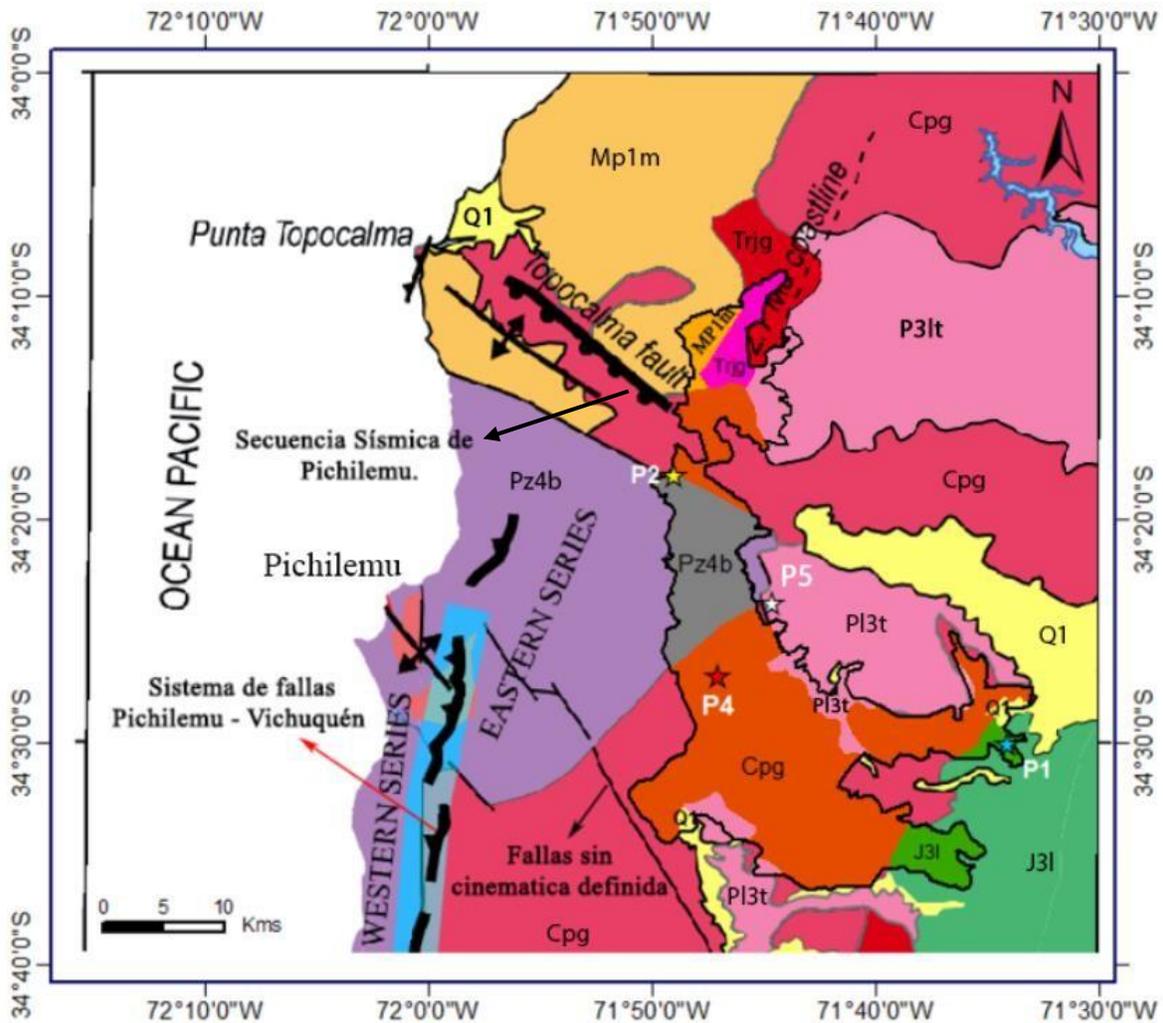


Figura 3.2: Mapa geológico de la zona de Pichilemu (SERNAGEOMIN, 2002); (Willner, 2005); (Richter, 2007); (Willner, 2009); (Farias, 2011). Delimitada por negro se localiza el área de estudio. Pz4b: Rocas metamórficas de la serie oriental; Cpg: Rocas plutónicas de edad Paleozoica; Trjg: Granodioritas del Jurásico; J3l: Sedimentos marinos y continentales del Mesozoico; MP1m: Rocas sedimentarias marinas del Mioceno-Pleistoceno; PI3t: Sedimentos continentales de edad Pliocena; Q1: Sedimentos Cuaternarios.

3.1.1 Complejos de acreción de la Cordillera de la Costa en Chile Central (Paleozoico tardío).

Entre las latitudes 32°- 42°S aparecen diversos afloramientos del basamento en la Cordillera de la Costa de Chile Central. Este basamento corresponde a un complejo metamórfico flanqueado al este por el Batolito Costero (Deckart, 2014).

Dicho complejo se encuentra subdividido en dos franjas N-S (Godoy, 1970) (Aguirre, 1972) que difieren entre sí por el protolito y el gradiente metamórfico, la Serie Occidental, de baja temperatura y alta presión, y la Serie Oriental, de alta temperatura y baja presión, (Figura 3.3) siendo esta última donde se localiza nuestro estudio.

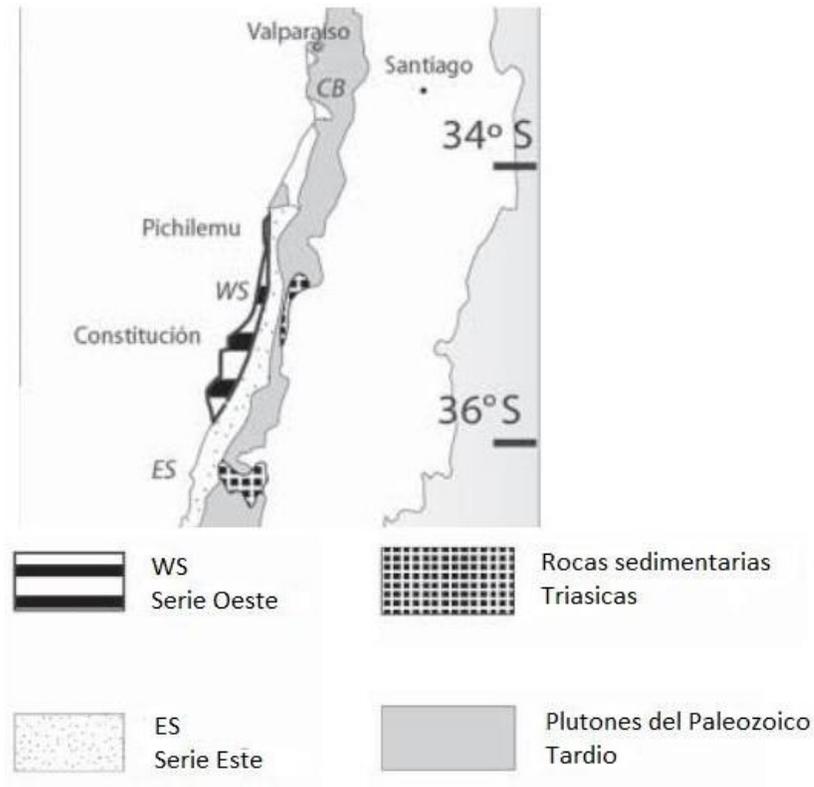


Figura 3.3: Mapa geológico que ilustra la ubicación de los complejos metamórficos presentes en el sector. (Moreno y Gibbons, 2007)

3.1.2 Rocas metamórficas (Pz4b)

A una escala regional, la Serie Oriental (ES) está compuesta principalmente por metawackas grises de origen turbidítico acompañada de lentes calcosilicatados (Moreno y Gibbons, 2007). Este complejo ha sido considerado de baja presión y alta temperatura, entre 400°C – 720°C, a una presión de $3 \pm 0,5$ kbar, alcanzando un grado metamórfico de transición entre facies anfibolita y granulita (Willner, 2005).

Pasando a una escala más local, en nuestro estudio, la Serie Oriental aflora en las comunas de Pichilemu y Marchigüe (Pz4b en Figura 3.2). Se trata de metareniscas, pizarras, filitas, esquistos, gneisses y anfibolitas, de edad paleozoica (Silúrico-Carbonífero) y como fue señalado con anterioridad, son rocas con metamorfismo de presión baja y temperatura alta. (Sernageomin, 2003)

3.1.3 Rocas intrusivas

Unidad Cpg

Conjunto de rocas plutónicas e hipabisales también de edad Paleozoica (Carbonífero-Pérmico) compuesta de granitos, granodioritas tonalitas y dioritas de hornblenda, biotita y moscovita. (Sernageomin, 2003)

Unidad Trjg

Rocas del Jurásico temprano (Farías, 2011) conformadas por granodioritas, monzogranitos, dioritas y gabros de piroxeno y hornblenda (Sernageomin, 2003).

3.1.4 Rocas sedimentarias

Unidad J3l

Rocas volcanosedimentarias Mesozoicas (Farías, 2011), continentales y marinas, constituidas por lavas basálticas a andesíticas, tobas riolíticas con intercalaciones de areniscas, calizas marinas y conglomerados continentales (Sernageomin, 2003).

Unidad MP1m

Sedimentos marinos del Mioceno- Pleistoceno temprano (Farías, 2011) compuestas de areniscas calcáreas, limonitas, conglomerados y limonitas con fósiles marinos (Rupp, 2011).

Unidad PI3t

Sedimentos continentales de edad pliocena (Farías, 2011). Principalmente depósitos piroclásticos de composición riolítica asociados a calderas de colapso (Sernageomin, 2003).

Unidad Q1

Sedimentos cuaternarios (Farías, 2011) conformados por depósitos aluviales, coluviales, de remociones en masa y en menor proporción fluvio-glaciares y deltaicos (Sernageomin, 2003).

3.1.5 Estructuras

La zona costera de la VI región se caracteriza por una serie de mega-alineamientos de orientación NW con estructuras tanto extensionales como compresivas (Farías, 2011), las cuales poseen antecedentes de actividad en diferentes zonas y épocas geológicas (Contreras y Schilling, s.f).

Una de las estructuras más interesantes se ubica en el Complejo Metamórfico Pichilemu, el que ha sido interpretado como un prisma de acreción separado en la Serie Oeste y la Serie Este por el sistema de fallas Pichilemu – Vichuquén (ver Figura 3.2 y Figura 3.4) y que corresponde a una serie de fallas compresivas con dirección N-S a NNE-SSW (Farías, 2011).

El segundo grupo de fallas coincide en orientación y cinemática con la Secuencia Sísmica de Pichilemu, la que es conocida como la falla Topocalma (ver Figura 3.2 y Figura 3.4). La que corresponde a un grupo de estructuras

extensionales de orientación NW (Farías, 2011). La Secuencia Sísmica de Pichilemu es un evento cortical desencadenado por el terremoto Mw= 8.8 que afectó a Chile el 27 de febrero de 2010 y que debido a la concentración de vegetación y suelos no se manifiesta en superficie (falla ciega) (Farias, 2011).

Finalmente, está la existencia de fallas sin cinemática definida, debido a la gran cantidad de vegetación y suelo en la zona. Esto último dificulta identificar los contactos entre las unidades geológicas y por tanto el movimiento que tuvieron estas estructuras (ver Figura 3.2 y 3.4).

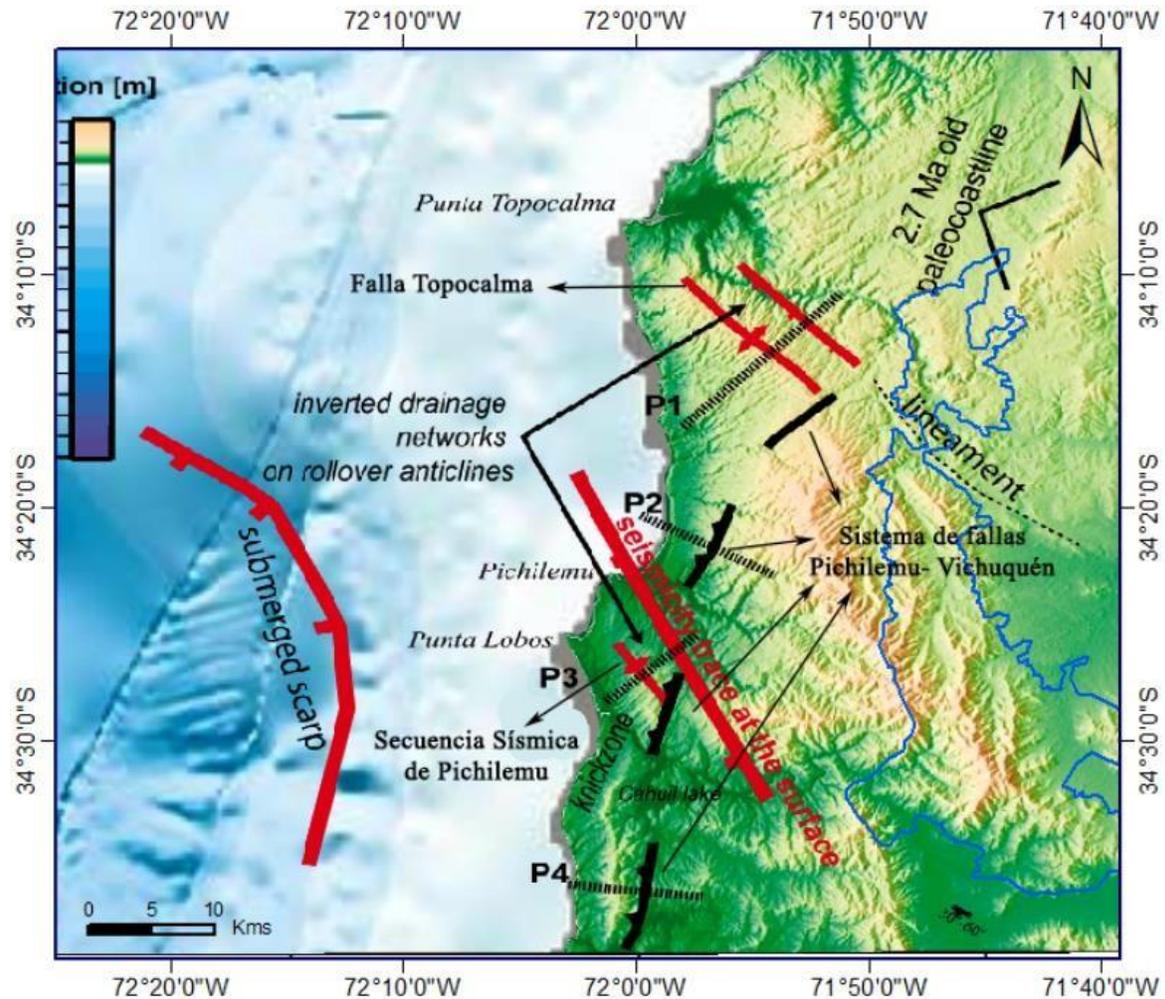


Figura 3.4: Estructuras geológicas de la zona de Pichilemu. Las líneas gruesas rojas superiores corresponden a la falla Topocalma, las rojas inferiores representan a la Secuencia Sísmica de Pichilemu mientras que las negras ilustran el sistema Pichilemu – Vichuquén. (Farías, 2011). Delimitada en azul se encuentra la zona de estudio.

3.2 Geología y Geomorfología local.

3.2.1 Geomorfología.

El área de estudio abarca 465,31 km² aproximadamente y se caracteriza por la presencia de cerros con baja pendiente y una altitud que no sobrepasa los 600 metros (Figura 3.5). La mayor parte de las pendientes no superan los 25° de inclinación, existiendo predominio de zonas prácticamente planas que no superan los 10° de inclinación (Figura 3.6). En cuanto a la exposición al sol se puede observar que no existe una tendencia clara, pero se puede apreciar una distribución en dirección norte y sur en la exposición de las laderas (Figura 3.7). Existe una carencia notable de afloramientos de rocas debido a la gran cantidad de suelo residual y/o transportado y vegetación presente en el sector.

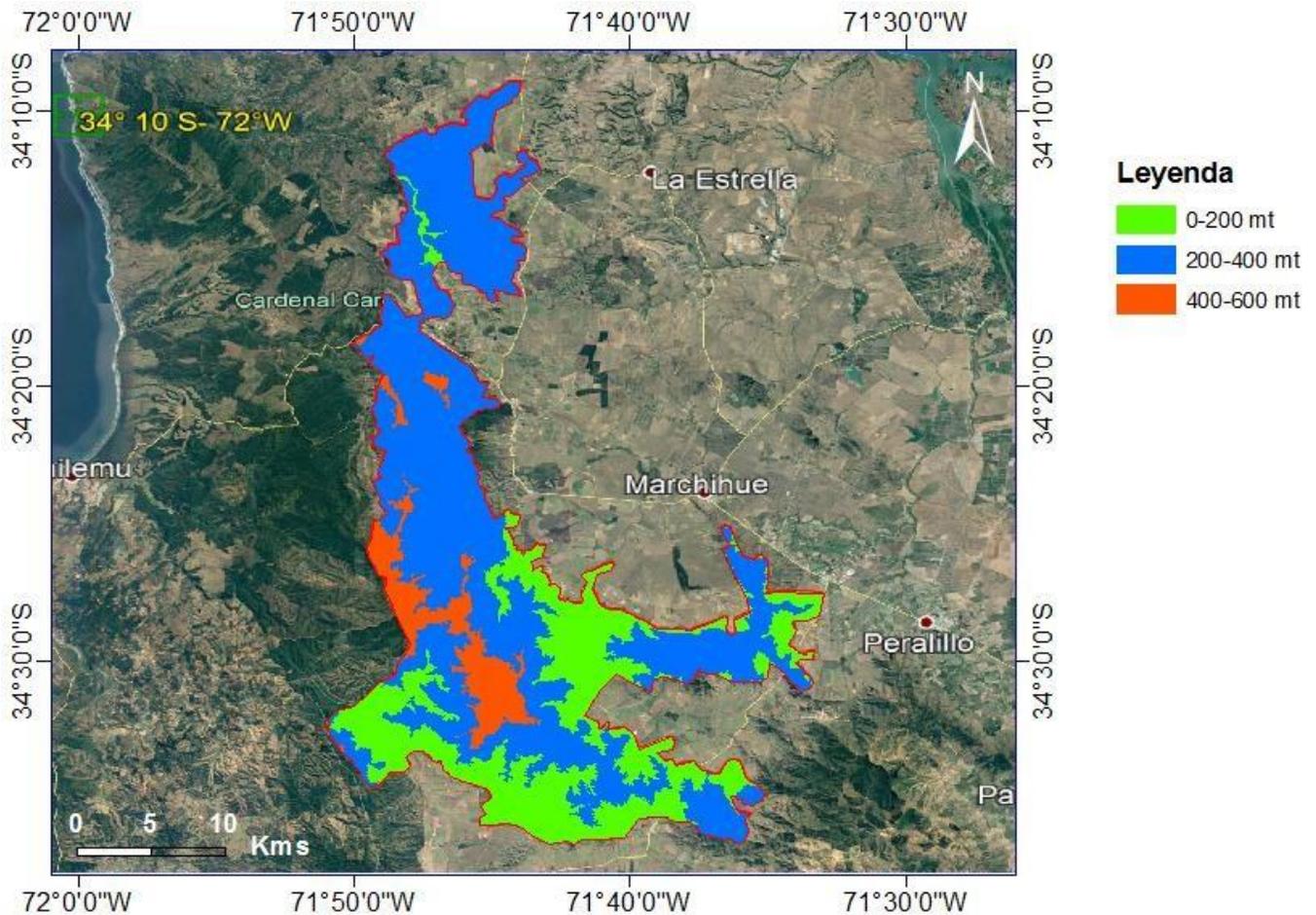


Figura 3.5: Mapa altitudes de la zona de estudio (Modificado de Conaf (2017)).

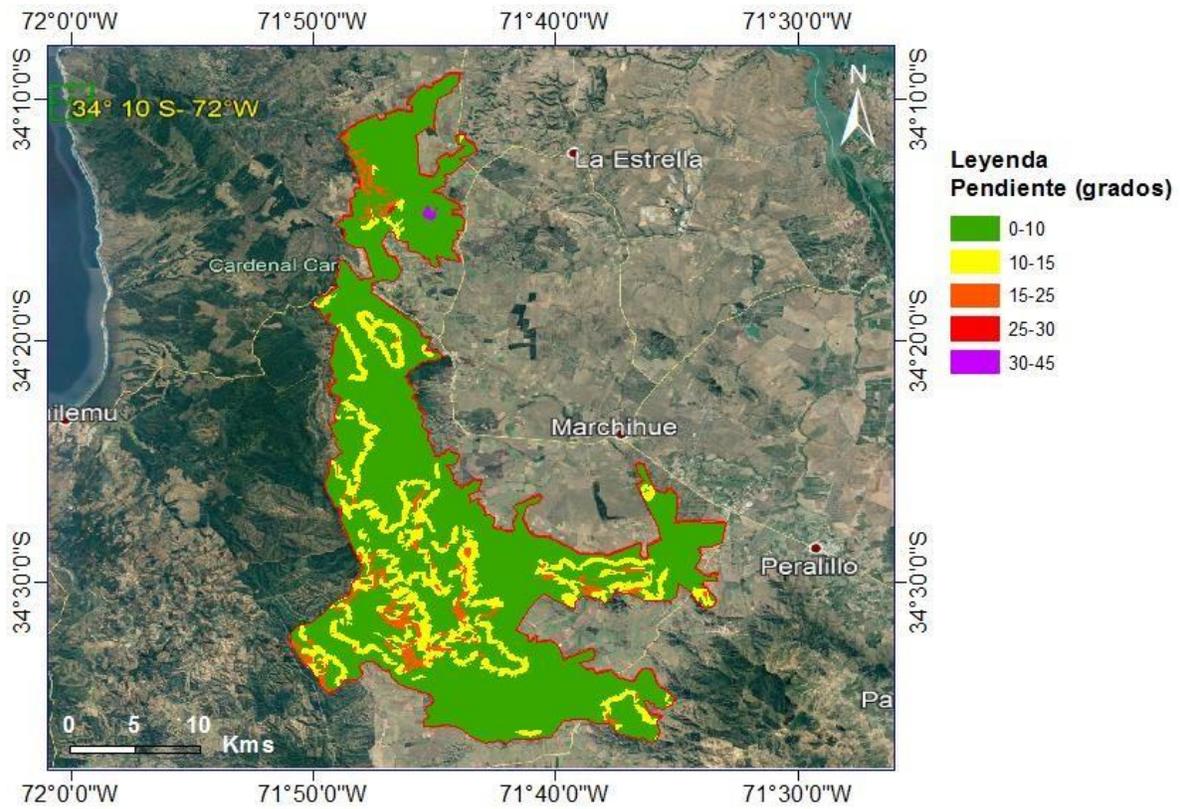


Figura 3.6: Mapa de pendientes de la zona de estudio (Modificado de Conaf (2017)).

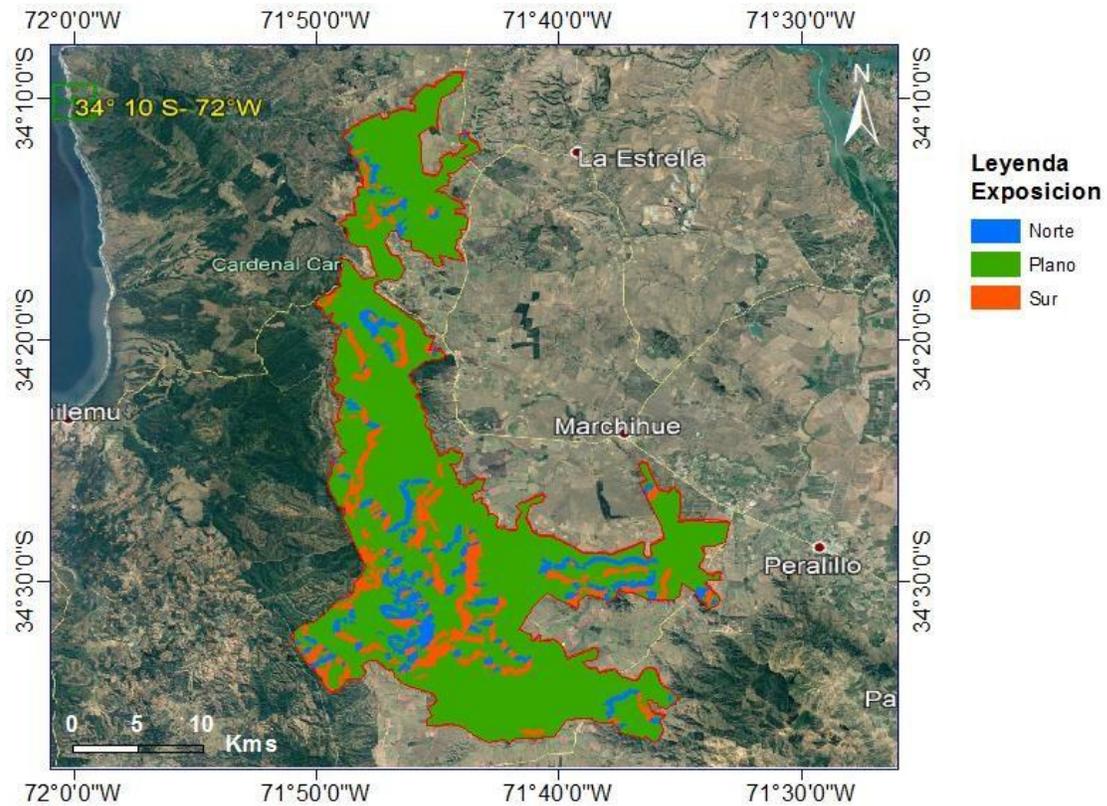


Figura 3.7: Mapa de exposición al sol de la zona de estudio (Modificado de Conaf (2017)).

3.2.2 Geología.

Unidades de roca.

No fue posible localizar afloramientos de roca en las imágenes satelitales con el programa Argis, ni tampoco con la campaña de terreno, debido principalmente a la abundante cantidad de suelo presente en el área y secundariamente a la vegetación que sobrevivió al incendio y/o a la que estaba volviendo a crecer, por lo que no se pudo caracterizar muestras de rocas para poder correlacionarlas con las unidades del mapa de la Figura 3.2.

Unidades de suelo.

El área está compuesta en su mayoría por suelo residual. Hay que agregar, que en este estudio solo se extrajeron muestras de suelo, por lo que era importante darle además una clasificación taxonómica al lugar del incendio (Ver Anexo F: Clasificación taxonómica de la USDA). En este caso, el sitio exhibe dos clases: alfisoles del tipo Xeralfs y alfisoles del tipo Rodoxeralfs.

a) Suelos residual.

La definición de “suelo residual” abarca todo suelo derivado de la meteorización y descomposición de la roca in situ, el cual no ha sido transportado de su localización original (Blight, 1997).

Esta unidad cubre casi todo el espacio (unidad Cpg, ver Figura 3.2) devastado por el fuego. Se encuentra constituido por material mayoritariamente de tamaño limo de color pardo-rojizo, con espesor desconocido. La mineralogía es principalmente arcillas con cuarzo, donde en algunos puntos se pudo identificar mica blanca y algunos minerales magnéticos, lo que lleva a pensar a una roca madre de tipo granítica (ver Figura 3.2) que pasó por fuertes procesos de meteorización para dar como resultado el suelo observado en las campañas de terreno (Luzio, 2010).

Las muestras obtenidas en terreno corresponden a este tipo de suelos.

Clasificación taxonómica de suelos.

Una de las razones principales de la casi nula presencia de afloramientos de roca en la VI región, fue la gruesa capa de suelo que cubre toda la zona. El sector afectado por las llamas del incendio de 2017 se caracterizaba, según la clasificación taxonómica de suelos de la USDA (Ver Anexo F), por poseer suelos del orden Alfisol (Figura 3.8) y que varía sus características según su roca madre, que en este caso vendría siendo rocas graníticas y metamórficas principalmente (Luzio, 2010).

Los suelos de origen granítico se componen de gravas angulares y subangulares de cuarzo, con diferentes grados de meteorización, donde el color predominante en los horizontes superficiales es el pardo rojizo oscuro y a medida que aumenta la profundidad, hacia el contacto con la roca granítica, dicho color se vuelve pardo rojizo. La clase textural, definida por la USDA (ver Anexo G: Clasificación textural de la USDA), del horizonte superficial es generalmente franco

arcilloso, variando entre franco arcillo arenosa y franco arcillo limosa, donde la fracción gruesa va aumentando en profundidad. Son suelos que presentan un buen drenaje debido a la topografía que ellos ocupan. Desde el punto de vista taxonómico son considerados como Xerafls (Luzio, 2010).

En la misma posición de los cerros de la Cordillera de la Costa, se observan otros suelos, cuyo origen se encuentra en las rocas metamórficas. Las condiciones texturales, de estructura, topografía, relieve, profundidad y drenaje son similares a los suelos de origen granítico. La diferencia más llamativa la constituye el color, que en estos suelos de origen metamórfico se hace notablemente más oscuro, siendo comunes los colores pardo rojizo oscuro y rojo fuerte. La meteorización de las rocas metamórficas proporciona también gravas cuarcíferas que se distribuyen aleatoriamente en los perfiles. Desde el punto de vista taxonómico son considerados como Rhodoxerafl (Luzio, 2010).

En la Figura 3.8 es posible apreciar que la muestra de severidad intermedia (P2) se clasifica en suelo de tipo Rhodoxerafls, a diferencia de las demás muestras que son Xerafls. Más adelante se podrá ver que las diferencias geológicas y geotécnicas de este suelo (P2) no eran muy distintas a las otras muestras a pesar de tener un protolito diferente según Luzio (2010).

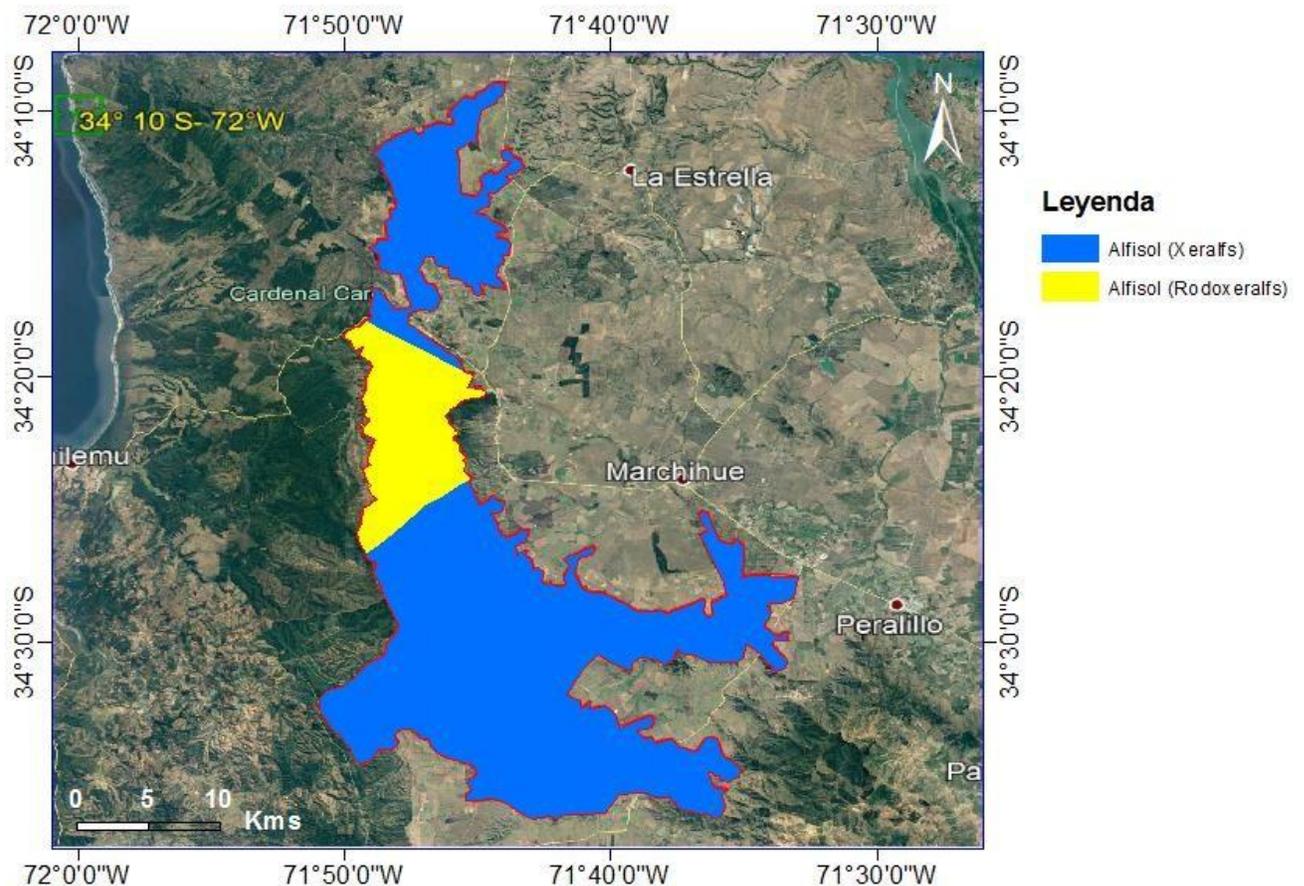


Figura 3.8: Distribución taxonómica de los distintos suelos en el área afectada por el incendio de 2017. En azul se observan los suelos de origen granítico (Alfisol Xerafls) mientras que en amarillos los de origen metamórfico (Alfisol Rhodoxerafl) (Modificado de Luzio (2010)).

4 Efectos del incendio

4.1 Vegetación.

Antes de la catástrofe incendiaria, las condiciones climáticas y morfológicas permitieron el desarrollo de una vegetación muy densa y abundante en toda la región, con una variedad de especies nativas, con predominio de bosque esclerófilo formado por especies como laurel, canelo, quillay, boldo, litre, peumo, maitén, lingue y espinos.

El bosque esclerófilo predomina en los sectores de la Cordillera de la Costa y la de los Andes, donde predominan los boldos y los peumos, debido a la mayor presencia de humedad. Mientras que los espinos abundan en la depresión intermedia (Conaf, 2017).

En la zona de estudio había una gran cantidad de especies introducidas por el hombre, que eran las que predominaban en los valles, y que se adaptaron a las condiciones de la zona como lo eran: álamos, pinos insignes y eucaliptus. Estas especies exóticas reemplazaron la vegetación nativa, la cual se encontraba muy explotada y deteriorada por el hombre (Figura 4.1) (Biblioteca del Congreso Nacional, sf.).

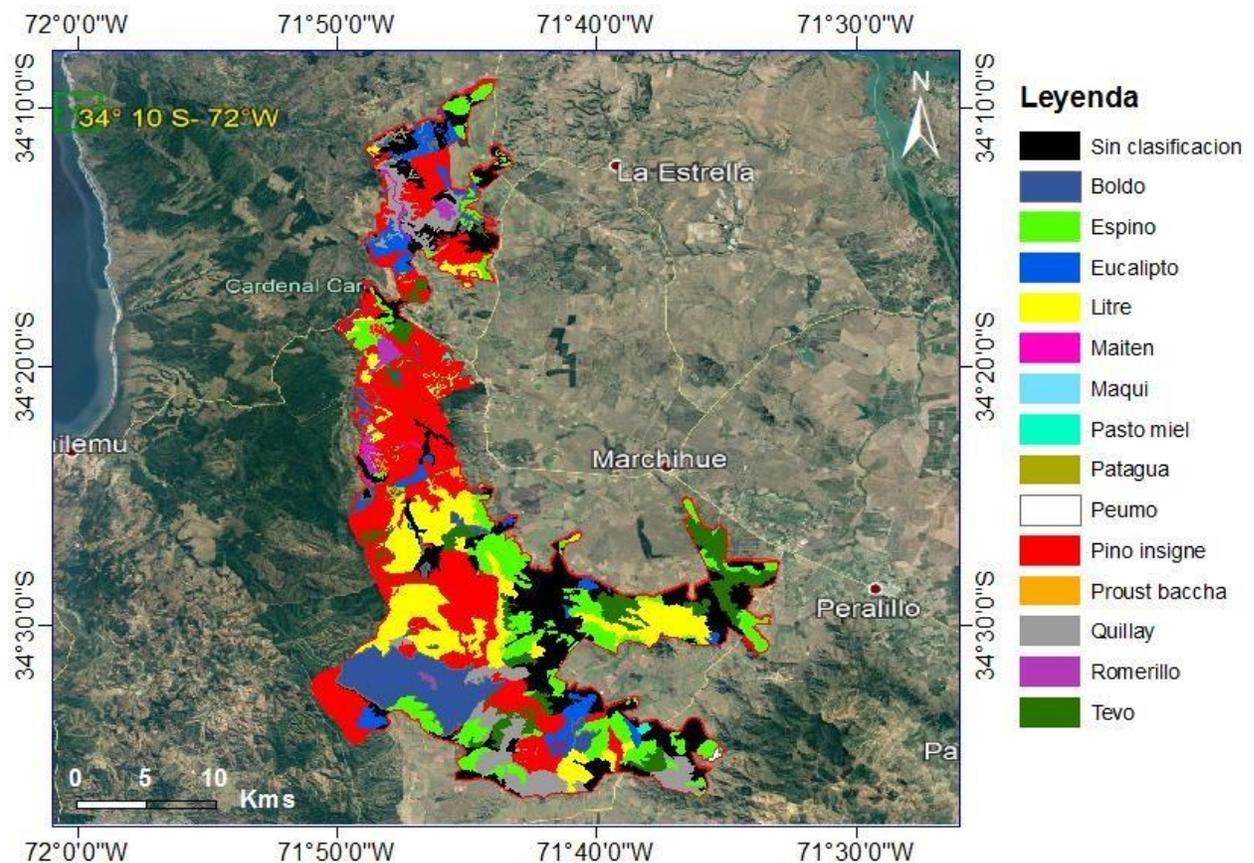


Figura 4.1: Tipo de vegetación presente antes del devastador incendio del 2017. Se puede apreciar el predominio que poseían las especies introducidas sobre las nativas (Modificado de Conaf (2017)).

El incendio que tuvo lugar en la VI región, trajo evidentes cambios en la densidad de la vegetación causando una disminución drástica y que actualmente aún no ha podido volver a sus condiciones iniciales. En la Figura 4.2 se puede observar la vegetación presente antes de la catástrofe incendiaria (14 de noviembre de 2016) y como el fuego consumió una gran porción de dicha vegetación, manteniéndose los daños desde el 6 de marzo de 2017 hasta comienzo del año 2018.

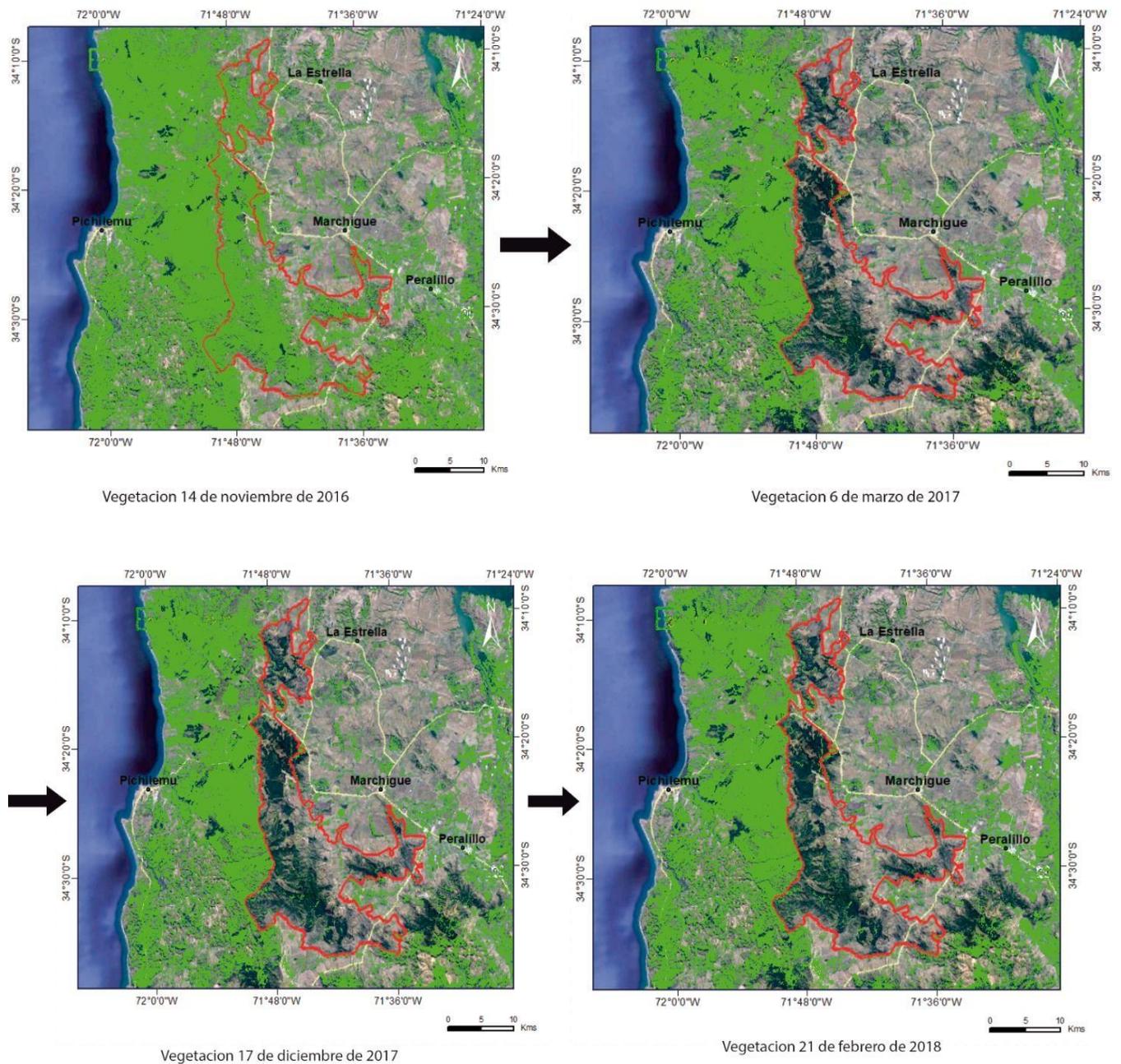


Figura 4.2: Evolución de la vegetación (Verde claro), según fechas, en áreas circundantes a la zona de interés (delimitada en rojo). En verde oscuro se encuentra marcada la vegetación que fue carbonizada por el fuego. Se puede apreciar como la vegetación es prácticamente nula, en el terreno delimitado en rojo, y que casi no ha sufrido cambios en el área de estudio después del incendio que tuvo lugar en el verano de 2017 (Imagen 6 de marzo de 2017 en adelante).

4.2 Grados de severidad del incendio.

Durante la campaña de terreno se visitaron las tres zonas de severidad (baja, media y alta) junto con la zona testigo, en las que fue posible detectar diferencias en los daños tanto en la vegetación como en los suelos. Los que fueron detallados a continuación:

a) **P1: Severidad baja.** Latitud: 34° 30' 779 S Longitud: 71° 34' 288 W

- Árboles claramente afectados en la base por el fuego, pero conservando sus hojas y ramas en las partes más altas. Hojas de color café en la base y más verdes en las alturas (Figura 4.3).

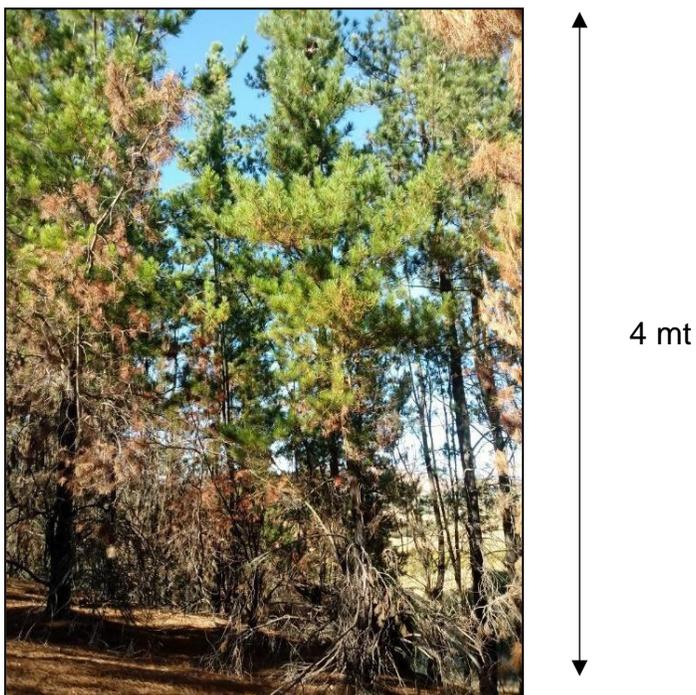


Figura 4.3: Contraste entre la base quemada y copa no quemada de los árboles (4 mt de altura aproximadamente) de la zona.

- Suelo arenoso de color negro, por material carbonizado, y aún con restos de cenizas en los alrededores (Figura 4.4).



Figura 4.4: Suelo afectado por las llamas, donde se puede apreciar el ennegrecimiento del suelo por el paso del incendio.

- Muestra A (suelo en superficie): El suelo quemado no supera 1 cm de espesor. Se observa bastante material orgánico quemado, como troncos y plantas, dándole una tonalidad de color negro a la muestra (Figura 4.5).



Figura 4.5: Daños provocados por el paso del fuego y que aún persisten a pesar del tiempo. Se puede observar un suelo de tonalidades grises con restos orgánicos carbonizados.

- Muestra B (suelo en profundidad a 25 cm aprox.): Color marrón claro con presencia a primera vista de limonitas y arcillas. El fuego no pareciera haber afectado este suelo y las raíces se veían intactas (Figura 4.6).

No se pudo observar en superficie el efecto de "greda cocida" o impermeabilización superficial descrito en la bibliografía.



Figura 4.6: Calicata fabricada en la zona de severidad baja donde es posible apreciar las tonalidades marrones del suelo y abundante material orgánico en profundidad.

b) P2: Severidad intermedia. Latitud: 34°18'559 S Longitud: 71°49'073 W

- Suelo muy blando al caminar, con abundante presencia de raíces y vegetación con daño parcial, con algunos árboles carbonizados y otros intactos (Figura 4.7). Abundante presencia de cuarzo y moscovita en los suelos del sector.

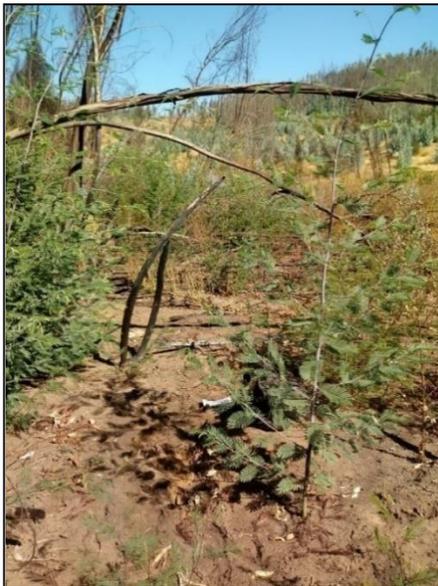


Figura 4.7: Estado de la vegetación en zona de severidad intermedia. Se puede apreciar que el daño fue solo parcial, solo con algunos árboles quemados y derribados, pero otros estaban intactos.

- Muestra A (superficial): El suelo quemado alcanza unos 4 cm de espesor, pero va tomando colores más claros a mayor profundidad. No pareciera haber crecimiento de nueva vegetación, la flora presente pareciera haber estado antes de la catástrofe.
- Muestra B (a unos 20 cm de profundidad): Suelo en profundidad de color marrón claro, con abundante presencia de mica blanca.



Figura 4.8: Contraste entre el suelo en profundidad (marrón claro, izquierda) y el suelo en superficie (marrón oscuro, derecha).

No se pudo observar en superficie el efecto de “greda cocida” o impermeabilización superficial descrito en la bibliografía.

c) P4: Punto severidad alta Latitud: 34°27'434 S Longitud: 71°47'968 W

- Daño significativo del fuego en los arboles del sector, quedando solo los troncos sin ramas ni hojas.
- Existe crecimiento de nueva flora, siendo el único punto de muestreo en el que ocurre, especialmente pinos pequeños.
- El fuego pareciera haber quemado siguiendo un patrón de líneas (ver Figura 4.10), debido a la existencia de plantaciones antes de que se produjera el incendio.
- Abundante presencia de material orgánico quemado.
- Existencia de cuarzo y arcillas mayoritariamente con presencia en menor proporción de mica blanca.



Figura 4.9: Zona de severidad alta. Los colores negros-grises corresponden a vegetación devastada por las llamas, aquí el consumo de los grandes árboles fue casi total. No obstante, es posible visualizar el crecimiento de nueva vegetación.



Figura 4.10: Sector severidad alta, patrón de líneas que quedó tras el paso del incendio.

- **Muestra A (muestra superficial):** Suelo superficial quemado de color marrón oscuro y negro. Se trata de material tamaño arena, mayormente, que a unos 2 cm de profundidad toma colores más claros.

- Muestra B (muestra en profundidad): Muestra de suelo en profundidad (15 cm) de tamaño arena, no cohesivo y de color marrón anaranjado. Abundante presencia de raíces sin quemar, aunque algunas raíces gruesas se quemaron superficialmente.



Figura 4.11: Calicata fabricada en el sector de alta severidad, donde se puede apreciar los tonos más rojizos que posee la zona.

No se pudo observar en superficie el efecto de "greda cocida" o impermeabilización superficial descrito en la bibliografía.



Figura 4.12: Raíz adyacente al punto de muestreo. Lo que es evidencia que el fuego fue capaz de alcanzar zonas más profundas gracias a algunas raíces.

d) P5: Muestra testigo Latitud: 34°23'509 S Longitud: 71°44'583 W

- Suelo marrón claro con abundantes clastos de cuarzo que no superaban los 15 cm.
- Impacto del fuego prácticamente nulo, salvo algunos troncos y rocas quemados pero la vegetación abunda en la zona (Figura 4.13).



Figura 4.13: Estado de la vegetación en el área no afectada por las llamas. Se puede apreciar la nula acción del fuego en el sector.

- Muestra A (muestra superficial): Suelo de color marrón claro con abundante cuarzo de tamaños variables.
- Muestra B: Suelo en profundidad (20 cm aproximadamente), el suelo tiende a tornarse rojizo y bastante duro (Figura 4.14).



Figura 4.14: Suelo en profundidad. Se puede constatar los tonos rojizos que va tomando el terreno a medida que va aumentando la profundidad.

4.3 Descripción macroscópica muestras. (Lupa binocular)

- Muestra superficial severidad alta de incendio: P4 A

Muestra conformada esencialmente por material orgánico quemado, con partículas de arcilla adheridas a gran parte de este último, algunos clastos de cuarzo y escasa presencia de minerales magnéticos. La abundante concentración de arcillas le da una coloración negra rojiza oscura, en vez de negra, a este suelo. Se trata de una muestra mal seleccionada con granos de tamaño arena y limo esencialmente, con partículas subredondeadas y subangulosas en su gran mayoría con dimensiones que comprenden los 5 mm a tamaños menores a 1 mm.

La consistencia es ligeramente dura ya que los agregados, que no superan los 5 mm de diámetro, resisten una presión moderada con los dedos. Al tacto abarca algo intermedio entre áspero y suave por lo que se podría clasificar esta muestra como franca en primera instancia.



Figura 4.15: Muestra superficial severidad alta de incendio con aumento de 15X (izquierda) y 45X (derecha), Se puede observar la forma irregular de los granos y como la arcilla se une a las partículas de mayor envergadura.

- **Magnetismo:** Muy marcado.



Figura 4.16: Muestra superficial de suelo de severidad alta. Se observa un predominio de colores negros y grises, por el material carbonizado, y en menor medida tonos marrones con algo de rojizo.

Por simplicidad, el resto de las muestras se encuentran resumidas en la Tabla 4.1 y descritas con detalles en *Anexos A: Descripción macroscópica muestras. (Lupa binocular).*

Muestra	Severidad	Color	Mineralogía	Textura (USDA)	Magnetismo	Protolito
P1-A	Baja	Entre marrón amarillento y negro	Cuarzo, arcillas y material carbonizado	Franco	Débil	Ígneo
P1-B	Baja	Marrón amarillento	Cuarzo y arcillas	Franco arcillosa	No presenta	Ígneo
P2-A	Intermedia	Entre marrón oscuro y negro	Cuarzo, arcillas, material carbonizado y algunas micas blancas	Franco limosa	Marcado	Metamórfico
P2-B	Intermedia	Marrón claro.	Cuarzo, arcillas y mica blanca	Franco limosa.	Débil	Metamórfico
P4-A	Alta	Negro rojizo	Cuarzo, arcillas y material carbonizado.	Franco	Muy marcado	Ígneo
P4-B	Alta	Marrón amarillento y rojizo	Arcillas y cuarzo	Franco arenosa	Muy marcado	Ígneo
P5-A	Testigo	Amarillo claro	Arcillas, cuarzo y material orgánico no quemado	Franco arcillosa	No presenta	Ígneo
P5-B	Testigo	Amarillo claro	Arcillas y cuarzo	Franco arcillosa	No presenta	Ígneo

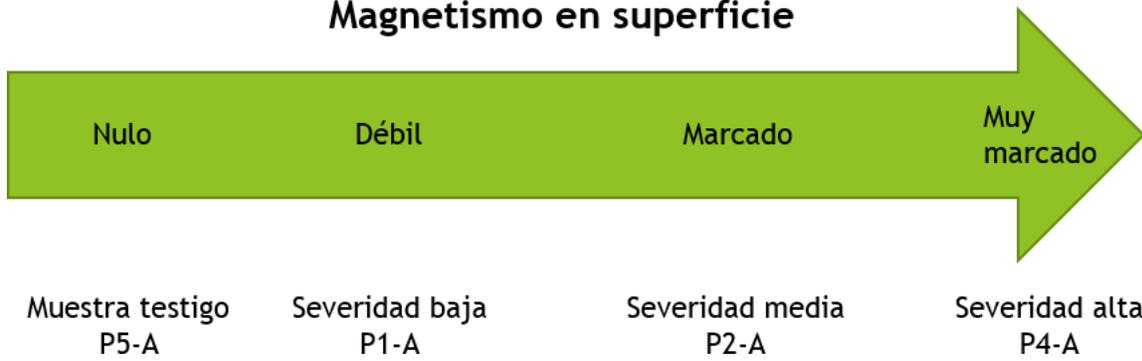
Tabla 4.1: Resumen de la descripción macroscópica de las muestras obtenidas de la zona de estudio. A: Muestras superficiales y B: Muestras en profundidad.

En la Tabla 4.1 es posible apreciar la mineralogía casi idéntica que poseían los suelos de protolito ígneo (ver Figura 3.2), lo que permitió que fueran muestras comparables entre ellas. Los suelos de severidad intermedia eran de mineralogía similar pero el hecho de que fueran de origen metamórfico, según la bibliografía, hizo que se tuviera cuidado al ser comparadas con las demás muestras.

Además, se puede ver como las muestras superficiales sufrieron cambios en su color. Donde los suelos que fueron atacados por las llamas (P1-A y P2-A) tendieron a ennegrecerse y ya en casos extremos adquirir tonos rojizos (P4-A).

El magnetismo es otra variable que tendió a aparecer en superficie después de la catástrofe incendiaria, aumentando en conjunto con el grado de severidad.

Magnetismo en superficie



4.4 Análisis FTIR.

Se aplicó un análisis FTIR a las ocho muestras extraídas y se estableció diferencias de concentración en 6 minerales; cuarzo, goethita, illita, mica blanca y montmorillonita. Esta selección mineralógica se llevó a cabo considerando el tipo de roca madre y el tipo de clasificación taxonómica obtenida de la bibliografía (ver Figura 3.2 y Figura 3.8 respectivamente). Es importante tener claro que estos minerales no componen el cien por ciento de los suelos estudiados, debido a que trabajar más minerales disminuye la confiabilidad del método. Los resultados se ilustran en la Figura 4.17:

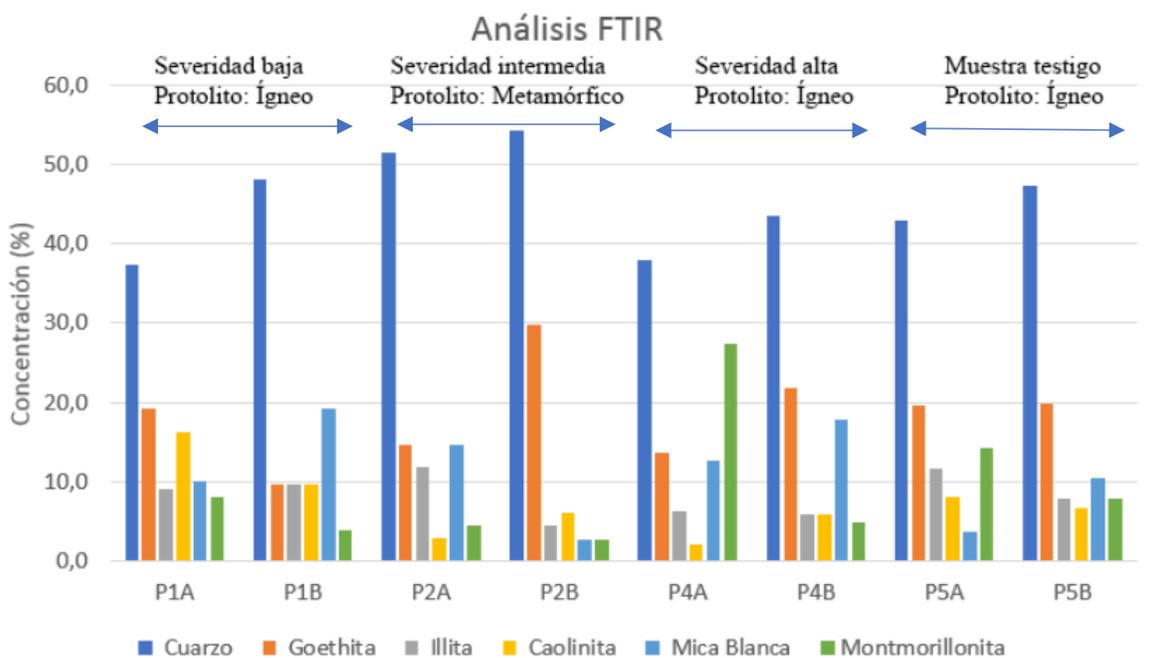


Figura 4.17: Análisis FTIR de las muestras obtenidas en terreno. Se puede ver las variaciones, en algunos casos bastante importantes, especialmente de los minerales de arcilla y la goethita en las zonas de severidad intermedia y alta. P1: severidad baja, P2: severidad intermedia, P4: severidad alta, P5: muestra testigo, A: muestra superficial y B: muestra en profundidad.

- En la Figura 4.17 es posible observar como las **muestras testigo** presentaron una composición mineralógica casi idéntica, tanto en superficie (P5-A) como en profundidad (P5-B), con leves diferencias en la concentración de la

montmorillonita y mica blanca. No fue posible detectar magnetismo en ninguna de las dos muestras aquí extraídas (P5-A y P5-B).

- La zona de **severidad alta** presentó en superficie (P4-A) una disminución de la concentración de goethita y caolinita, siendo la primera mucho más significativa, respecto a la muestra obtenida en profundidad (P4-B). El contenido de montmorillonita, en superficie, casi triplicó la cantidad presente al suelo extraído en profundidad y es casi el doble de la que no fue atacada por las llamas (P5-A). Hay que añadir que, gracias a la descripción macroscópica, fue posible detectar minerales magnéticos en las dos muestras obtenidas en el área de severidad alta, cosa que no ocurrió en los suelos de la zona testigo.

De acuerdo a Tan (1986), generalmente no se producen cambios mineralógicos por incendios ya que el primer paso para la destrucción de minerales, la deshidratación mineral (deshidroxilación), ocurre sobre los 500°C. Pero, dado que un área incendiada clasificada con severidad alta puede haber alcanzado una temperatura más elevada (Ulery y Graham, 1993), es bastante probable que ocurrieran transformaciones mineralógicas especialmente en las arcillas y los óxidos de Fe (Ketterings y Bigham, 2000). Lo que podría dar explicaciones al porqué de las diferencias mineralógicas en superficie y profundidad de la zona de severidad alta, lo que no se observó en las muestras testigo (P5-A y P5-B)

De acuerdo a Cornell y Schwertmann (1996), la goethita se altera a hematita a 300°C y sobre los 600°C se transforma en maghemita (Ketterings y Bigham, 2000). Estas afirmaciones permitirían explicar la disminución de goethita en los suelos superficiales (P4-A), donde la temperatura superó los 500°C, y coincidiría con el fuerte magnetismo, derivado de la maghemita, que presenta esta muestra.

Sin embargo, y según Rab (1996), la temperatura en un incendio no es homogénea por lo que una zona clasificada con una determinada severidad es en realidad un mosaico caótico donde se alternan diferentes grados de severidad en un mismo sector, y por ende de temperaturas. Lo que significa que en esta área de severidad alta habrían existido puntos donde no se alcanzaron los 500°C, por lo que no toda la goethita se transformó en maghemita sino que parte de ella habría originado hematita dando las tonalidades rojizas al área, que sumado al material carbonizado dio el color negro rojizo presente en superficie en el sector (P4-A).

No obstante, estos colores rojizos, dados por la hematita, y magnetismo se extienden a la muestra en profundidad (P4-B). Lo que es llamativo ya que según DeBano (2000) el suelo es muy mal conductor del calor, aun teniendo temperaturas sobre los 800°C en superficie, por lo que a 20 cm de profundidad prácticamente no hay calentamiento, por lo que esta hematita no derivaría del incendio en estudio. Esta hematita puede haberse originado en un siniestro anterior, considerando la tasa de incendios anuales, pero el problema es que no existe un catálogo detallado de las catástrofes incendiarias ocurridas en Chile ni que lugares fueron consumidos por el fuego en el pasado que apoye esta teoría. Otra posibilidad, y considerando la

presencia de raíces quemadas en el punto de extracción, es que el fuego haya aprovechado las raíces para propagarse (ver Figura 4.12) y con eso aumentara la temperatura en profundidad para dar origen a la hematita y maghemita presente en profundidad, pero es poco probable ya que las raíces carbonizadas solo muestran daño superficial, lo que según Certini (2005) sería señal de poco tiempo de exposición y temperaturas que no superarían los 250°C, insuficiente para la transformación de goethita.

Pasando a las arcillas, la estructura de la caolinita es destruida sobre los 550°C (Certini, 2005), y dado que en esta zona fácilmente se podría haber excedido dicha temperatura es posible que parte de esta arcilla haya sido transformada en otro mineral, y haber provocado una leve disminución de concentración en superficie (P4-A) y respecto a la muestra testigo (P5-A).

Por otra parte, el aumento significativo de la montmorillonita en superficie (P4-A) podría deberse a la transformación normal, por el transcurso del tiempo y la meteorización a condiciones atmosféricas, de illita a esmectita (grupo de arcilla al que pertenece la montmorillonita) siguiendo la siguiente secuencia (Egli, 2003):



Otra alternativa sería que esta montmorillonita (en P4-A) se haya originado por la transformación de la illita como resultado de la acción del fuego, con este último actuando como catalizador para el proceso de meteorización (Pope y Goring, 2010). Sin embargo, esta última idea no está suficientemente estudiada y es necesaria una mayor investigación para sacar argumentos más fiables, ya que en este estudio no se consideró la influencia del tipo de vegetación en el incendio, por ejemplo.

El déficit de montmorillonita en profundidad (P4-B) podría deberse, ya que según Lahanm (1980), en condiciones normales y donde la litología es constante, hay una continua disminución en la concentración de esmectita (por ende, de montmorillonita) a medida que aumenta la profundidad por las diferencias de presión y temperatura que eso conlleva. El problema de esta hipótesis es que a 20 cm de profundidad la presión no es mucha y la temperatura no varía demasiado por lo que debe profundizarse más en este punto para sacar conclusiones confiables.

- La zona de **severidad intermedia**, al igual que la de severidad alta, tuvo una disminución de la concentración de goethita y caolinita en superficie (P2-A) respecto al suelo obtenido en profundidad (P2-B). Con la salvedad que aquí el mineral que presentó un aumento es su cantidad superficial fue la illita, manteniendo el contenido de montmorillonita levemente mayor en superficie.

Según Ketterings y Bigham (2000), un área de severidad intermedia está caracterizada por temperaturas de 300-400°C con un periodo menor de exposición a las llamas que una severidad alta. Estas condiciones llevarían a la goethita a sufrir

transformaciones, considerando que a 300°C pasa a ser hematita (Cornell y Schwertmann, 1996), disminuyendo su presencia en superficie (P2-A). No obstante, existen varios factores a tener en cuenta: como el tiempo de exposición que tuvo el suelo al fuego, la cantidad de humedad presente, tipo de vegetación, clima, entre otros. Dichas variables podrían haber impedido la transformación completa entre goethita-hematita y formar una fase de transición de goethita-protohematita-hematita (Kustova, 1992) lo que no permitió que en el sector (P2-A) se desarrollara el cambio a una tonalidad rojiza, característica de la hematita, sino que más bien que tomara colores café amarillentos alternado con el negro del material carbonizado.

Teniendo en consideración, además, que la temperatura de un incendio no es homogénea (Rab, 1996), se podría suponer que temperaturas sobre los 500°C pueden haber sido alcanzadas en pequeños puntos y dar facilidades para la destrucción de la caolinita en superficie y la aparición de maghemita, derivada de la goethita, en superficie (P2-A). Esto último daría una explicación al porqué del magnetismo de esta muestra, que no fue tan marcado como en la zona de severidad alta.

La mayor concentración de illita en superficie (P2-A) podría ser atribuida a la reacción inversa de lo ocurrido en la zona de severidad alta (esmectita a illita), lo que explicaría la caída de montmorillonita (en P2-A y P2-B) respecto a los suelos de otras severidades. El cambio de esmectita está en mayor parte controlado por la temperatura, más que variables como el tiempo o la presión, entre rangos de 70-250°C (Pytte y Reynolds, 1989), condiciones bastante similares a las de un incendio de severidad intermedia. Sin embargo, debido a que estos datos se obtuvieron por estudios hechos en rocas que sufrieron metamorfismo bajo, con presiones bajas (pero no necesariamente cero) y con tiempos que involucraban años y no días, es muy poco probable que la transformación se haya debido a efectos del fuego. Más bien, y coincidiendo con la mineralogía de la zona (ver Figura 2.1), la formación de la illita se debería a la meteorización de las rocas con metamorfismo de grado bajo, con presencia de moscovita, presentes en la zona (Mindat, sf).

Pasando al suelo en profundidad (P2-B), lo más llamativo es la gran abundancia de goethita y la que sería responsable de las tonalidades amarillentas de la muestra. Como se dijo anteriormente, la transmisión de calor es bastante ineficiente por lo que a unos pocos de cm de profundidad ya no existe un calentamiento (DeBano, 2000), lo que justificaría la nula transformación de este mineral a hematita o maghemita. La existencia en demasía de la goethita probablemente se deba a procesos naturales de meteorización, ya que este óxido de Fe es un componente habitual de suelos debido a la transformación de otros minerales de hierro en ambientes oxigenados.

A pesar de lo anterior, la muestra en cuestión (P2-B) posee magnetismo lo que denota presencia de minerales como la magnetita o maghemita. Al igual que en la

zona de severidad alta, se puede atribuir a una catástrofe incendiaria anterior o por la percolación de estos minerales desde la superficie, donde están presentes en abundancia, debido a la lluvia. Pero esta última teoría es poco creíble ya que, y al igual que la zona de severidad alta, existe la posibilidad de que por las altas temperaturas alcanzadas se haya originado una capa de “greda cocida” impermeable (Haigh, 2009), que con efecto del viento y la lluvia desapareció antes de llevar a cabo la extracción de muestras, y ceniza cercana a la superficie que impidió que estos minerales fueran transportados a profundidad. Otra alternativa, sería que estos minerales magnéticos deriven del metamorfismo de bajo grado que sufrió la zona, lo que también es poco verosímil ya que las temperaturas de un metamorfismo de bajo grado no exceden los 300°C, muy por debajo para la aparición de estos minerales de Fe magnéticos. Es necesario un estudio más acabado para determinar el origen de la magnetita/ maghemita de ambas muestras (P2-A y P2-B) y corroborar si derivan de un mismo evento o no tienen relación alguna.

Adicionalmente, es posible visualizar el leve descenso de las concentraciones de montmorillonita a medida que aumentamos la profundidad (P2-B). Como se explicó de antemano, este mineral tiende a disminuir su cantidad por el cambio de las condiciones externas de manera natural (Lahanm, 1980).

No obstante, hay que tener en cuenta que el protolito de la zona de severidad intermedia es roca metamórfica, diferente a todas las demás severidades que es ígneo. Por lo que puede que los suelos de esta zona no sean comparables con los demás, pero aun así es interesante ver la respuesta de distintos suelos a la acción del fuego.

- La zona de **severidad baja** (P1-A y P1-B), a diferencia de los dos sectores antes descritos, no sigue el mismo patrón con la goethita y caolinita que las zonas de severidades más elevadas, donde estos minerales disminuían su concentración en superficie, aquí ocurre lo opuesto y la cantidad presente de estos minerales en las muestras superficiales (P1-A) son mayores que en profundidad (P1-B). La illita no presentó un cambio significativo en su concentración, en ambas muestras, pero la montmorillonita disminuyó levemente su porcentaje en profundidad (P1-B).

Una superficie categorizada por una severidad baja de incendio se caracteriza por una exposición corta a temperaturas entre 100-250°C (Ketterings y Bigham, 2000). Debido a esto, los minerales presentes en superficie no sufrieron cambio alguno y por tanto no existió transformación de, por ejemplo, goethita en hematita/maghemita o destrucción de la caolinita, lo que explicaría su concentración anormal y el menor magnetismo respecto a los sectores donde la temperatura y tiempo de exposición fue más elevado.

No obstante, hay que tener en consideración que el muestreo se llevó a cabo un año después ocurrido el devastador incendio por lo que ciertos minerales pueden haber sido removilizados por efecto del viento o la escorrentía, provocada por la lluvia, por lo que las interpretaciones aquí hechas se encuentren alteradas debido a

estos factores. Además de que no fueron consideradas el efecto de variables, en el suelo y el incendio, como: la humedad, las cenizas y el tipo de vegetación.

A pesar de lo anterior se pudo apreciar como el magnetismo de las muestras superficiales se incrementaba a medida que aumentaba el grado de severidad junto con el innegable cambio en las tonalidades debido al fuego. Estas modificaciones, según estos resultados, serían atribuidas a cambios mineralógicos principalmente en la goethita.

4.5 Límites de Atterberg.

Los resultados para determinar el grado de plasticidad que poseían los suelos afectados con diversas severidades por el incendio se encuentran ilustrados en la Figura 4.18 (Detalles de clasificación en Anexos D: Clasificación Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)):

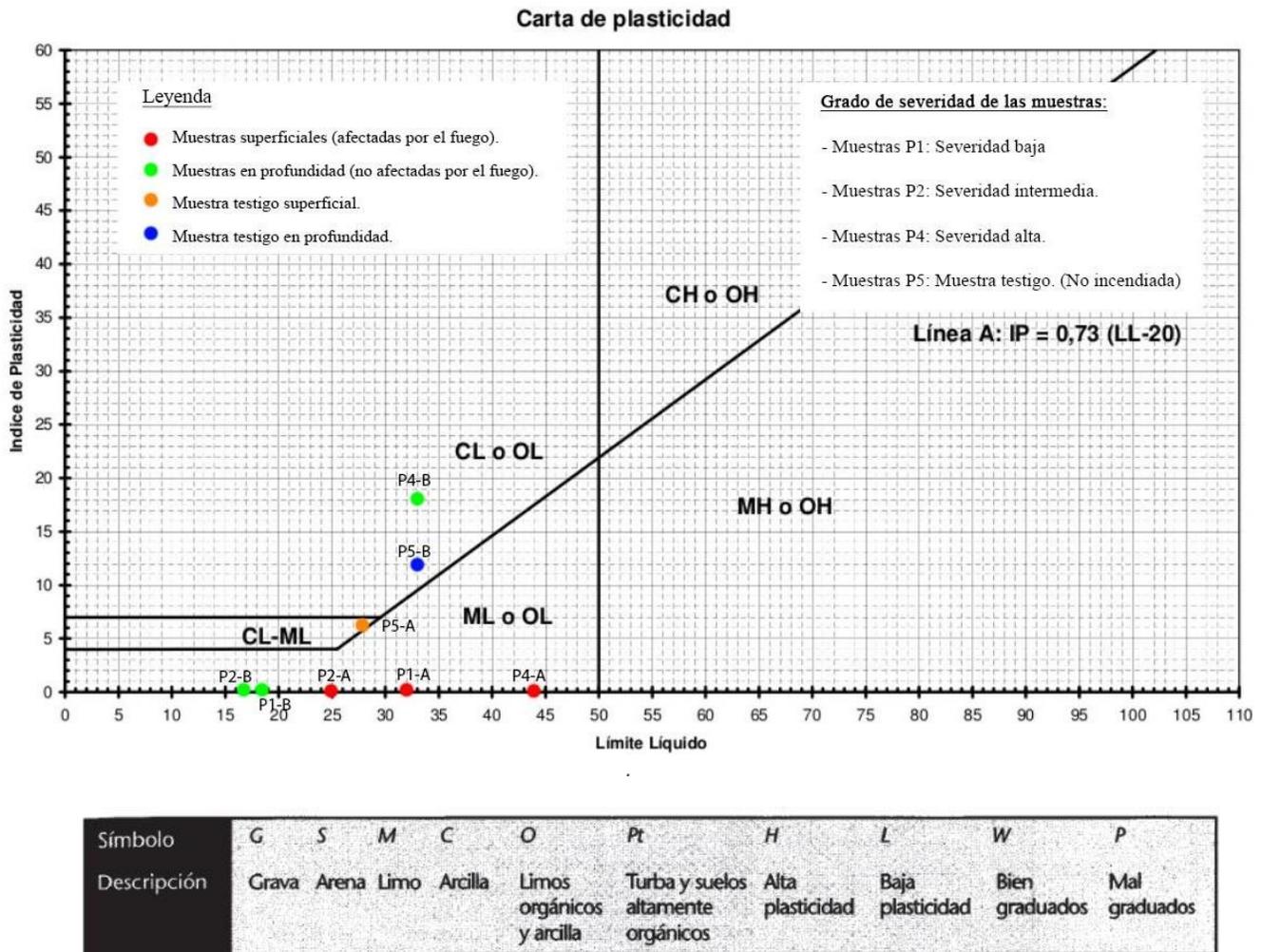


Figura 4.18: Carta de plasticidad que muestra los índices de plasticidad de las distintas muestras extraídas en la campaña de terreno.

En general se puede apreciar como la mayoría de los suelos obtenidos no tenían índice de plasticidad (IP), debido a que no poseían límite plástico (LP), con excepción de las muestras testigos (P5-A y P5-B) y la de severidad alta en profundidad (P4-B) que caen en la categoría de arcillas de baja plasticidad.

$$I_p = LL - LP$$

El hecho de que el límite plástico sea nulo en la mayoría de las muestras es bastante llamativo y extraño, considerando que según los resultados de FTIR todos los suelos cuentan con arcillas plásticas (caolinita). Una alternativa es que se hayan cometido errores durante la metodología que provocarán a que dichas arcillas se perdieran en el proceso. Otra opción es la abundante presencia de materia orgánica, especialmente en las muestras afectadas directamente por el fuego (P1-A, P2-A y P4-A), que según Yong y Warketin (2002) tiene una influencia importante en el LP sin afectar el límite líquido (LL), llegando a hacerse cero en suelos turbosos o altamente orgánicos (FAO, sf).

A pesar de lo anterior, resulta interesante ver los cambios que se producen en el LL de las muestras. Es posible notar como el límite líquido aumenta en todas las muestras que estuvieron en contacto directo con el fuego respecto a su análoga en profundidad. Sin embargo, esto no ocurre en el sector de la muestra testigo (P5), en el cual su límite líquido es menor en superficie (P5-A).

Pero dado que los distintos tipos de arcillas responden de diferente manera a la temperatura y los comportamientos tanto sobre el LP como en el LL varían ampliamente (Zihms, 2013) no es posible establecer una influencia directa del incendio sobre los límites de plasticidad de las muestras estudiadas. Sumado a eso, hay que considerar que el muestreo llevado a cabo en este estudio se compone de mezclas de diversos tipos de arcilla, minerales, humedades y vegetación por lo que es difícil determinar que componente o factor es el que predomina la hora de evaluar cambios en los límites de plasticidad.

4.6 Análisis de granulometría.

Los estudios para evaluar los tamaños de granos de todas las muestras se pueden observar en las Figura 4.19 y Figura 4.20, siendo separadas en aquellos suelos extraídos en superficie y los que fueron obtenidos a 20 cm de profundidad respectivamente:

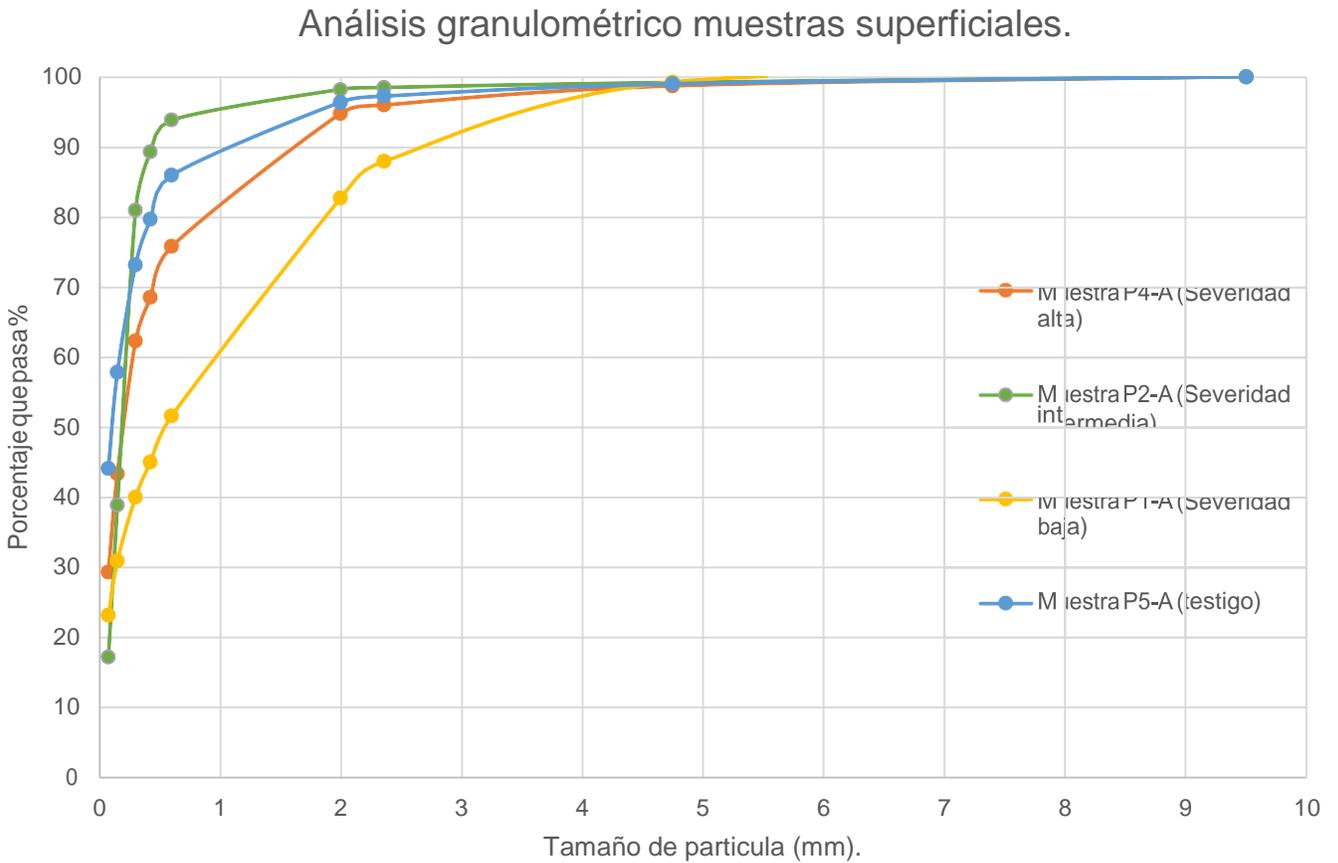


Figura 4.19: Análisis de granulometría de todas las muestras sacadas en superficie. Se aprecia como todos los suelos afectados directamente por el fuego, independiente de su severidad, disminuyeron su porcentaje de finos (partículas menores a 0,075 mm de diámetro) respecto a la muestra testigo (donde el % que pasa es alrededor del 45% mientras que las demás muestras no superan el 30%).

Análisis granulométrico muestras en profundidad

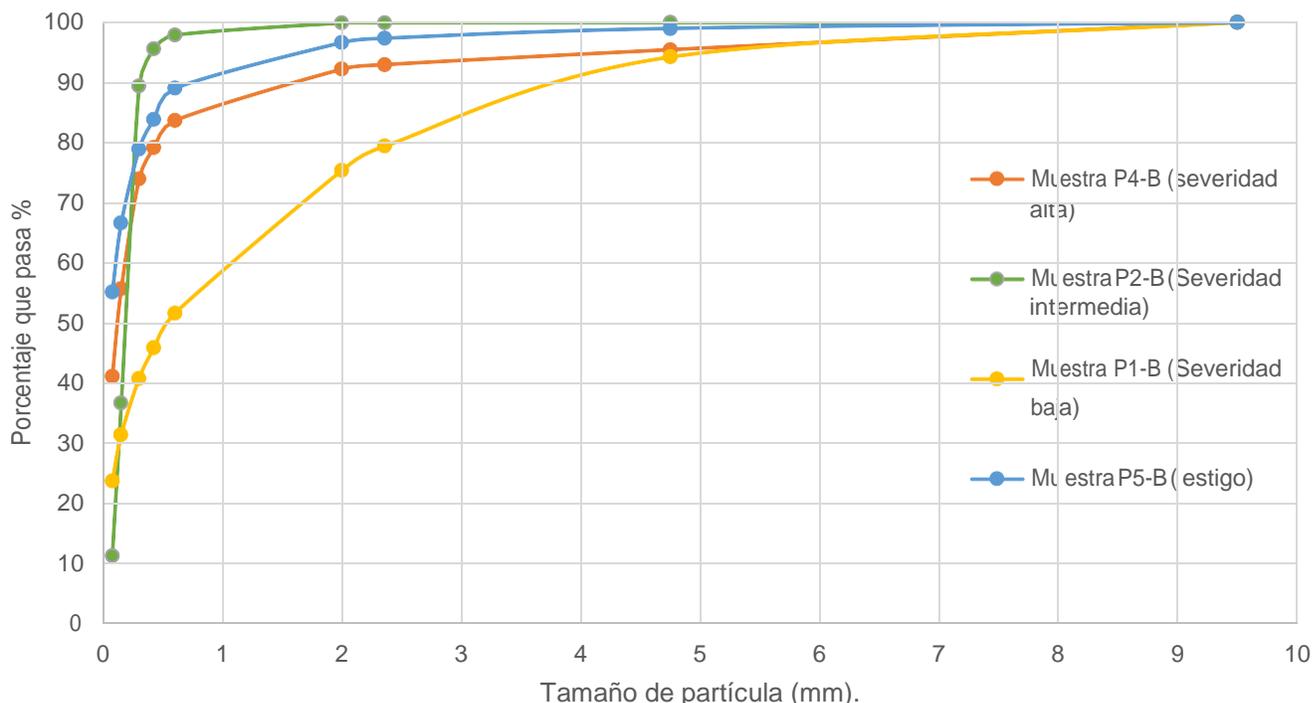


Figura 4.20: Análisis granulométrico de los suelos extraídos a 20 cm de profundidad. Se puede apreciar que los valores obtenidos son bastante similares a las muestras en superficie, con excepción de la de severidad alta donde el porcentaje de partículas más finas se incrementan casi al doble a 20 cm de profundidad.

Las muestras superficiales afectadas por las llamas presentan una disminución en el porcentaje de partículas finas (que pasan por el tamiz N° 200) respecto al suelo que no fue atacado (P5-A) por el incendio. Pasando de un 45 % aproximadamente, en la muestra testigo, a menos del 30% en los suelos quemados. No obstante, estos cambios difícilmente pueden ser asociados a efectos directos del incendio ya que las zonas de severidad baja e intermedia presentan una distribución de tamaño de grano bastante similar tanto en superficie (P1-A y P2-A respectivamente) como en profundidad (P1-B y P2-B).

Sin embargo, la muestra superficial de severidad más alta (P4-A) presentó una disminución considerable en el porcentaje que pasó por el último tamiz, respecto a su homóloga extraída en profundidad (P4-B), pasando de un 41 % a solo un 29 % en superficie, aunque esta tendencia se ve reflejada desde partículas con tamaño menor a 0,6 mm de diámetro (tamiz N° 30). Aquí el incendio pudo haber tenido una incidencia indirecta sobre las partículas más finas, y es que debido a las temperaturas y tiempo de exposición más prolongados existe una mayor probabilidad que la capa vegetal que cubría el suelo haya desaparecido dejándolo más propenso a la erosión por el viento y/o la lluvia haciendo que estos granos más finos se removilizaran a otros sectores (Mermut, 1997). Otra alternativa es que las altas temperaturas superficiales hayan llevado a las partículas más finas a unirse con los granos de tamaño arena (0,0625-2 mm) (Zihms, 2013) y dado que el suelo es muy mal conductor del calor (DeBano, 2000), estas temperaturas no llegaron a las partículas en profundidad que no permitieron esta unión de granos.

A pesar de lo anterior, y viendo las Figuras 4.19 y 4.20, no es posible establecer una incidencia directa del fuego en el tamaño de las partículas que componen los suelos estudiados.

4.7 Ensayo de permeabilidad.

Los resultados de los ensayos de permeabilidad, llevados a cabo durante los muestreos, se encuentran expuestos en la Tabla 4.2:

Punto muestreo	Coefficiente de permeabilidad (cm/s)
P1 (Severidad baja)	0,080
P2 (Severidad intermedia)	0,086
P4 (Severidad alta)	0,066
P5 (Muestra testigo)	0,093

Tabla 4.2: Resultados ensayos de permeabilidad.

Es posible ver un leve descenso en las permeabilidades en relación a la muestra testigo, siendo la zona de severidad alta la que presentó menor permeabilidad de todos los sectores evaluados.

Hay que tener en consideración que los incendios forestales son uno de los mayores causantes, y en muchos casos es el factor desencadenante, del aumento de la repelencia al agua que exhibe un suelo (DeBano, 1996).

Según Jaramillo (2004) la repelencia al agua se desarrolla en un intervalo reducido de temperaturas, entre los 175-200°, y sobre los 300°C es destruida. Un incendio se caracteriza por tener muchas temperaturas por lo que es difícil determinar qué efecto tuvo la catástrofe incendiaria del 2017 sobre la permeabilidad suelo, aun teniendo una clasificación preliminar de severidad del fuego, ya que como se puede apreciar en la Tabla 4.2 los coeficientes son prácticamente iguales y todos caen en la categoría de una buena permeabilidad (Figura 4.21)



Figura 4.21: Coeficiente de permeabilidad de diferentes tipos de suelo. La marca de color rojo marca el punto donde aproximadamente caen la mayoría de las muestras de este estudio, suelos de buena permeabilidad, aunque el tamaño de grano más adecuado sería arenas finas con mezcla de limos y arcilla orgánicos.

Adicionalmente, la repelencia al agua ocurre también en suelos no afectados por incendios forestales y depende principalmente del tipo de vegetación presente

y la humedad (Mataix-Solera, 2007). Está demostrado que suelos con baja razón de materia orgánica/arcilla y una elevada presencia de caolinita son poco susceptibles a desarrollar esta propiedad (Mataix-Solera, 2007). Lo anterior denotaría que el fuego puede no tener relación con los resultados aquí obtenidos y que las mediciones hechas se deban a similitudes en la vegetación, humedad y composición de los suelos estudiados.

Ya que estos resultados son bastante similares, y tomando en cuenta que los suelos extraídos tienen la misma mineralogía, existe la posibilidad de que la capa impermeable nunca se haya desarrollado en la zona de estudio. Teniendo presente que una zona de severidad intermedia (P2) y alta (P4) fácilmente exceden los 300°C, y además que el incendio duró varios días, es probable que la hidrofobicidad haya sido erradicada. Por otro lado, una zona de severidad baja (P1) presenta rango de temperaturas entre 100-250°C por lo que quizás el calor alcanzado no fue suficiente, o el tiempo de exposición fue muy breve, para que los componentes hidrofóbicos de la materia orgánica se volatilizarán dando como resultado que no apareciera la repelencia al agua y que los valores de permeabilidad fueran similares a los demás puntos de muestreo.

Otra opción, y teniendo en consideración que el muestreo se llevó a cabo en un poco más de año después del mega incendio, es que los efectos del incendio hayan desaparecido y que el suelo haya vuelto a sus valores de permeabilidad iniciales (pre-incendio), lo que explicaría la no presencia del efecto de “greda cocida” en ninguno de los puntos de extracción. Existe estudios, en zonas abruptas con piedras y vegetación quemada, donde los valores de escorrentía, infiltración y erosión volvieron a su estado original al cabo de un año (Lavee, 1995) aunque lo normal es que sean transcurridos al menos 2 años (Marques y Mora, 1992) pero depende de múltiples factores en los que hay que considerar indudablemente el clima y la tasa de recuperación de la vegetación.

No debe pasarse por alto que el tipo de vegetación y el contenido de humedad pre incendio tienen un efecto importante en el desarrollo de esta capa hidrofóbica siendo el *Pinus halepensis* (pino de Alepo) y el *Rosmarinus officinalis* (romero) los mayores inductores de sustancias hidrofóbicas en el suelo (Tessler, 2008) de modo que sería interesante extraer muestras en las mismas zonas de severidad pero con diferente vegetación antes y después de la catástrofe para tener la posibilidad de estudiar posibles cambios de permeabilidad.

Considerando lo anterior, los datos de la Tabla 4.2 y lo visto en terreno, no es posible corroborar una influencia del incendio en una variable como lo es la permeabilidad en profundidad. Tampoco pudo verificarse la existencia del efecto de “greda cocida” o impermeabilización en superficie por lo que el efecto del fuego aquí también sería poco claro. Sin embargo, no hay que olvidar el efecto del tiempo en este estudio, los datos obtenidos pueden estar completamente alterados, por lo que no hay que aventurarse demasiado en descartar la alteración de permeabilidad por efecto del fuego.

4.8 Consistencia de agregados.

La estabilidad de los agregados de las distintas muestras arrojó los siguientes resultados (Tabla 4.3):

Muestra	Consistencia	Comentarios
P1-A (Severidad baja).	Suelto.	El suelo no tiene coherencia (estructura de grano suelto).
P1-B (Severidad baja).	Muy friable.	El suelo se desmenuza muy fácilmente bajo muy ligera presión.
P2-A (Severidad intermedia).	Suelto.	El suelo no tiene coherencia (estructura de grano suelto).
P2-B (Severidad intermedia).	Suelto.	El suelo no tiene coherencia (estructura de grano suelto).
P4-A (Severidad alta).	Duro.	El suelo resiste una presión moderada, apenas se puede romper entre el pulgar y el índice, pero se puede romper en las manos sin dificultad.
P4-B (Severidad alta).	Firme.	El suelo se desmenuza bajo una presión moderada, pero se nota resistencia.
P5-A (Muestra testigo).	Muy duro.	El suelo resiste una gran presión, no se puede romper entre el pulgar y el índice, pero se puede romper en las manos con dificultad
P5-B (Muestra testigo).	Muy duro.	El suelo resiste una gran presión, no se puede romper entre el pulgar y el índice, pero se puede romper en las manos con dificultad

Tabla 4.3: Resultados ensayos de consistencia en suelo seco (en superficie (A)) y suelo húmedo (en profundidad (B)).

La estabilidad, o consistencia, de los agregados pueden variar tras el paso del fuego y generalmente se detecta una reducción de la consistencia de los agregados relacionado con la pérdida de materia orgánica (Cerde, 1993). Esto se puede apreciar en las muestras superficiales de severidades intermedias (P2-A) y bajas (P1-A), donde se observa una disminución de estabilidad respecto a la muestra testigo (P5-A).

La estabilidad de los agregados cae drásticamente con altas temperaturas, no obstante, los agregados que sobreviven al paso de las llamas pueden mostrar una estabilidad mayor y/o similar a la inicial debido a la cementación de óxidos (Giovannini y Lucchesi, 1997), a fusiones de arcillas por calcinación que endurecen los agregados (Giovannini y Lucchesi, 1990) o incluso cementación por las

sustancias hidrofóbicas que los hacen más resistentes (Giovannini y Lucchesi, 1983). Lo que permitiría explicar en nuestro caso porque la zona de severidad alta (P4-A) presenta una consistencia similar a la muestra testigo (P5-A).

A pesar de lo anterior, y considerando que el suelo es muy mal conductor de calor (DeBano, 2000), es apresurado atribuir estos resultados a la acción del fuego ya que los cambios superficiales, de consistencia, entre las zonas con diferentes severidades de incendio no se observan de igual manera en profundidad teniendo las muestras en profundidad consistencias iguales o muy similares a su homóloga en superficie. Dado que las altas temperaturas no alcanzan más que unos pocos cms de profundidad, sería esperable que existieran diferencias entre las muestras someras y en profundidad, clasificadas con la misma severidad, por lo que es necesario realizar un análisis más profundo para sacar conclusiones más acabadas.

5 Conclusiones y Recomendaciones.

El incendio que tuvo lugar en la zona de Nilahue-Barahona trajo cambios en el suelo solo a nivel superficial. Estos estuvieron fuertemente relacionados con el grado de severidad y el tiempo de exposición de los suelos al fuego. En menor medida, otros elementos pre existentes como la mineralogía, humedad y vegetación jugaron también un papel en estas modificaciones del terreno.

Las modificaciones geológicas, en superficie, post incendio más apreciables, fueron la mineralogía y el color. En las zonas donde el fuego tuvo alta intensidad el suelo adquirió propiedades magnéticas y el color tendía a volverse rojizo y/o gris/negro, por el material carbonizado y las cenizas. Otras propiedades como la plasticidad, granulometría, permeabilidad y consistencia no se vieron alteradas por el incendio.

El paso del fuego no originó alteraciones a 20 cm de profundidad debido a la mala conductividad del calor que poseen los suelos.

Se recomienda llevar un análisis más detallado y acabado para corroborar lo aquí expuesto, realizando un muestreo mayor al realizado en este estudio. Sería óptimo llevar a cabo análisis con un mayor número de muestras para ver el grado de influencia de otras variables como la humedad o la vegetación. Además, el tiempo transcurrido desde el incendio fue de aproximadamente un año, por lo que las muestras de suelo quemado no representan una fiabilidad completa en cuanto a comportamiento geotécnico, y tampoco mineralógico si es que existió removilización de material.

Otra sugerencia pasa por los análisis de laboratorio empleados en este estudio. El FTIR por sí solo no es demasiado confiable a la hora de identificar algunos minerales ni mucho menos el porcentaje presente en las muestras en estudio, por lo una complementación con Difracción de rayos X o SEM son aconsejables para obtener un mayor grado de certeza en los resultados.

6 Bibliografía.

- Aguirre, L., Herve, F., Godoy, E., 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile. An outline. *Kristalinikum*, No. 9, p. 7-19.
- Apuntes ingeniería civil. Sf. Límites de atterberg: Contracción. http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/11/normal-0-false-false-false_23.html
- ASTM D4318-95a, sf. Standard Test Method for Liquid Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM D422, sf. Test procedures for Particle-Size Analysis – Mechanical Method.
- Biblioteca del Congreso Nacional. sf. Clima y vegetación Región Libertador Bernardo O´Higgins. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region6/clima.htm>
- Bisdom, E., Dekker, L., Schoute, J., 1993. Water Repellency of Sieve Fractions from Sandy Soils and Relationships with Organic Material and Soil Structure.
- Blight, G., 1997. Mechanics of residual soils. Balkema/Rotterdam, 237 p.
- Bodí, B., 2014. Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects (vol 130, pg 103, 2014)
- Casanova, M., Vera, W., Luzio, W., y Salazar, O., 2004. Edafología Guía de clases prácticas. Facultad de ciencias agrónomas de la Universidad de Chile.
- Cerda, A., 1993. Incendios forestales y estabilidad de los agregados. Cuadernos de geografía, n° 53, 1-16.
- Certini, G., 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review.
- Charrier, R y Muñoz, N., 1994. Jurassic Cretaceous palaeogeographic evolution of the Chilean Andes at 23°-24° S Latitude and 34°-35°S Latitude: A comparative analysis. In: Reutter, K-J., Scheuber, E. & Wigger, P. (editores): Tectonics of the Southern Central Andes
- Ciancaglini, N., sf. Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico
- Conaf, 2017-A. Número y Superficie Afectada por Incendios Forestales por Comunas 1985 – 2017 Conaf, 2017-A. Número y Superficie Afectada por Incendios Forestales por Comunas 1985 – 2013 <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/Estadísticas>
- Contreras, J., Schilling, M., sf. Mega-Lineamientos Noroeste (NW) en Chile Central. Cicatrices profundas de la corteza continental.
- DeBano, L., Krammes, J., 1966. Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* 2:14-19.
- DeBano, L., 1981. Water repellent soils: a state of the art, edited by United States Department of Agriculture, Berkeley (California).
- DeBano, L., 1991. Effects of fire on soil properties. General Technical Report, INT-280, USDA Forest service, Berkeley, CA.
- DeBano, L., 1996. Formation of non-wettable soils involves heat transfer mechanism. USDA Forest service research Note PSW-132, Berkeley, CA.
- DeBano, L., Neary, D.G., Ffolliott, P.F., 1998. Fire's effects on ecosystems. New York: John Wiley & Sons, Inc. 333 p.

- DeBano, L., 2000. The role of fire and soil heating on water repellence in wildland environments: a review.
- Deckart, K., Hervé, F., Fanning, M., Ramírez, V., Calderón, M., and Godoy, E., 2014. U-Pb Geochronology and Hf-O Isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, South-Central Chile. *Andean geology*, 41(1), 49-82.
- Deeming, J.E., Burgan, R.E., Cohen, J.D., 1977. The national fire danger rating system, 1978. Gen. Tech. Rep. INT-39. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 63 p.
- Dirección Meteorológica de Chile. sf. Clima de Chile Región Libertador Gral. Bernardo O'Higgins. Recuperado de: http://www.mapasdechile.com/clima_region06/.
- Dirección Meteorológica de Chile, sf. Servicios climáticos. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/productos/recienteEma/340066>.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth-Science. Reviews* 51:33-65.
- Egli, M., Mirabella, A., Fitze, 2003. Formation rates of smectites derived from Holocene chronosequences in the Swiss Alps.
- Fao, sf. Permeabilidad del suelo. http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm
- Farías, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D., Pardo, M., 2011. Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence.
- Frandsen, W.H., 1987. The influence of moisture and mineral soil on the combustion of smoldering forest duff. *Canadian Journal of Forest Research*. 17: 1540–1544.
- Fowler, M., sf. Historical Beginnings of Theories of Electricity and Magnetism
- Geoseismic, 2017. ¿Qué son las calicatas? <http://www.geoseismic.cl/calicatas/>
- Giambiagi, L., Tunik, M., Ghiglione, M., 2001. Cenozoic tectonic evolution of the Alto Tunuyán foreland basin above the transition zone between the flat and normal subduction segment (33° 30' S -34° S), western Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 14, p. 707-724.
- Giambiagi, L.B., Ramos, V.A., Godoy, E., Alvarez, P.P., Orts, S., 2003. Cenozoic deformation and tectonic style of the Andes, between 33° and 34° south latitude.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., 1983. Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates.
- Giovannini, G., Lucchesi S., 1990. Effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant growth. *Soil Science*, n° 149, 344-350.

- Giovannini, G., Lucchesi, S., 1997. Modifications induced in soil physico-chemical parameters related to soil aggregation and erodibility.
- Godoy, E., 1970. Estudio petrográfico del Granito de Constitución y su aureola de Metamorfismo. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 130 p. Santiago.
- Goforth, B., Graham, R., Hubbert, K., Zanner, W., Minnich, R., 2005. Spatial distribution and properties of ash and thermally altered soils after high-severity forest fire, southern California.
- Greenpeace, 2016. Incendios Forestales ¿Qué perdemos? <http://archivos.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/incendios-forestales-que-per.pdf>
- Griffiths, P., De Haseth, J., 2007. Fourier Transform Infrared Spectrometry (2nd ed.).
- Haigh, M., 2009. Fire Effects on Soils and Restoration Strategies. Volume 5 of Series: Land Reconstruction and Management, Oxford Brookes University, Oxford.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Jackson, M., Roering, J., 2008. Post-fire geomorphic response in steep, forested landscapes: Oregon. Department of Geological Sciences, University of Oregon, USA. Quaternary Science Reviews.
- Jaramillo, D.F., 2004. Repelencia al agua en suelos. Con énfasis en andisoles de Antioquia. Universidad nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias. Medellín.
- Kettering, Q.M., Bigham, J.M., 2000. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash and burn fires in Sumatra, Indonesia.
- Kustova, G.N., Burgina, E.B., Sadykov, V.A., Poryvaev, S.G., 1992. Vibrational Spectroscopic Investigation of the Goethite Thermal Decomposition Products.
- Lahann, R. W., 1980. Smectite diagenesis and sandstone cement: The effect of reaction temperature.
- Lambe, W., 1999. Mecánica de Suelos. Impreso en México.
- Lambe, T.W., 1951. Soil Testing for Engineers Wiley, New Cork, Capítulo 3. (Biblioteca ingeniería civil)
- Lara M., 2007. Metodología para la Evaluación y Zonificación de Peligros de Remociones en Masa con Aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Lavee H., Kutiel P., Segev M., Benyamini Y., 1995. Effect of surface roughness on runoff and erosion in a Mediterranean ecosystem: the role of fire.
- Luzio, W., 2010. Suelos de Chile, Santiago de Chile, MAVAL.
- Marqués, M., Mora, E., 1992. The influence if aspect on runoff and soil loss in a Mediterranean burnt forest (Spain).
- Mataix-Solera, J., Doerr, S., 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire affected pine forest in southeastern Spain.

- Mermut A.R., Luk S.H., Romkens M.J.M., Poesen J.W.A., 1997. Soil loss by splash and wash during simulated fire induced pyrolysis.
- Mery, R., 1980. Determinación manual de la textura de suelos mediante la técnica del “tacto”.
- Mindat, sf. Illite. <https://www.mindat.org/min-2011.html>.
- MOP, 1985. Ministerio de Obras Públicas, laboratorio nacional de vialidad. Curso Laboratorista vial, Volumen 1, Geotecnia.
- Moreno, T., Gibbons, W., 2007. The Geology of Chile. The Geological Society, London.
- Oswald, B.P., Davenport, D., Neuenschwander, L.F., 1999. Effects of slash pile burning on the physical and chemical soil properties of Vassar soils.
- Pytte, A.M., Reynolds, R.C., 1989. The Thermal Transformation of Smectite to Illite
- Pope, G., Gorring, M., Feng, H., 2010. Effects of high-intensity forest fires on soil clay mineralogy.
- Rab, M., 1996. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the Eucalyptus regnans forest of southeastern Australia.
- Richter, P. Ring, U., Willner, A. and Leiss, B., 2007. Structural contacts in subduction complexes and their tectonic significance: The Late Palaeozoic coastal accretionary wedge of central Chile, J. Geol. Soc.,
- Solís, J. N., 2004. Fundamentos de Edafología. San José: EUED.
- Tan, KH., Hajek, BF., Barshad, I., 1986. Thermal analysis techniques. American Society of agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp 151-183.
- Tassara, A., Yáñez, G., 2003. Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47°S). Revista Geológica de Chile, vol.30, no.2, p.159-186.
- ThermoFisher Scientific. sf. Introduction to FTIR spectroscopy. <https://www.thermofisher.com/cl/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html>
- Tessler, N., Wittenberg, L., Malkinson D., Greenbaum, N., 2008. Fire effects and short-term changes in soil water repellency – Mt Carmel, Israel.
- Tomás., s.f. Manejo de la lupa binocular o microscopio estereoscópico, Valencia
- Turiscom, 2004. Mapa rutero 6ta región de O’Higgins. <http://www.turismovirtual.cl/v/v.html>
- Ulery, A.L., Graham, R.C., 1993. Forest fire effects on soil color and texture. Soil Science Society of America Journal, Vol. 57, 135-140.
- Willner, A. P., 2005. Pressure- temperature evolution of a Late Paleozoic paired metamorphic belt in north- central Chile (34°–35°30’ S).
- Willner, A., Richter, P. and Ring, U., 2009. Structural overprint of a late Paleozoic accretionary system in north- central Chile (34°–35°S) during post-accretional deformation, Andean Geol.,
- Zagal, E., Sadzawka, A., 2007. Protocolo de Métodos de Análisis para Suelos y Lodos. Universidad de Concepción Facultad de Agronomía, Chillán.p.11-12.

- Zihms, S., Switzer, C., Karstunen, M., Tarantino, A., 2013. Understanding the effects of high temperature processes on the engineering properties of soils.
- Yong y Warketin, 2002. *Soil Mechanics Basic Concepts and Engineering Application*. Aysen.

7 Anexos

Anexo A: Descripción macroscópica muestras. (Lupa binocular)

- Muestra superficial severidad baja de incendio: P1 A

La muestra está compuesta principalmente por cuarzo, arcillas y materia orgánica quemada con cantidades ínfimas de biotita que no sobrepasan el 2% del total de la muestra (Figura 7.1). Los colores varían entre marrón amarillento y negro (este último por el material quemado). Mal seleccionada con granos de tamaño grava, limo grueso y arena. De consistencia ligeramente dura, ya que resiste una presión moderada con los dedos, con agregados que no superan los 5 mm. Al tacto, la muestra es intermedia entre áspera y suave lo que lleva a clasificarla con una textura franca (Ciancaglini, sf).

El cuarzo es el mineral más abundante después de las arcillas, presencia de las variables lechosa y transparente de este silicato, granos mayoritariamente angulosos de tamaños variables que van desde unos 5 mm a $\ll 1$ mm de diámetro.

Las arcillas presentan una amplia gama de tamaños, pero es muy abundante la parte limosa y arcillosa ($< 0,0625$ mm), la cual está adherida a partículas de mayor tamaño, especialmente al material orgánico que fue afectado por las llamas.

Es posible divisar, con el máximo aumento de la lupa binocular, un mineral negro que pareciera ser biotita, pero en muy pocas cantidades que no superan el 2% del total de la muestra de suelo.

- **Magnetismo:** Presencia de algunos clastos con magnetismo, no muy abundante, pero existe.



Figura 7.1: Muestra superficial de suelo con severidad baja con un aumento de 10X con la que es posible diferenciar los distintos tamaños de partículas, algunos minerales como el cuarzo y la materia orgánica carbonizada.



Figura 7.2: Muestra a simple vista severidad baja donde se puede apreciar el predominio del color negro sobre los marrones amarillentos que posee el suelo.

- Muestra en profundidad (15 - 20 cm) severidad baja de incendio: P1 B

Muestra constituida principalmente por arcillas y algunos cristales de cuarzo. Este último se encuentra cubierto por el material arcilloso de menor tamaño. Los colores cambian a marrones claros amarillentos, más claros que en superficie. Suelo medianamente seleccionado con partículas subredondeadas y subangulosas que abarcan tamaños de 5 mm y \ll 1 mm, siendo estos últimos los más abundantes.

El cuarzo presente es mayoritariamente transparente, anguloso y sin una forma definida que raramente sobrepasa el mm de diámetro.

El suelo presenta unos pocos granos de color negro y unas cuantas raíces que podría corresponder a material que fue atacado por el fuego del incendio.

La consistencia del material es blanda ya que los agregados se desarman con mucha facilidad entre los dedos de la mano a la menor aplicación de presión. Al tacto la muestra varía entre suave y ligeramente áspera lo que nos llevaría a clasificarla en primera instancia como un suelo de textura franco-arcillosa (Ciancaglioni, sf).

- **Magnetismo:** No presenta.

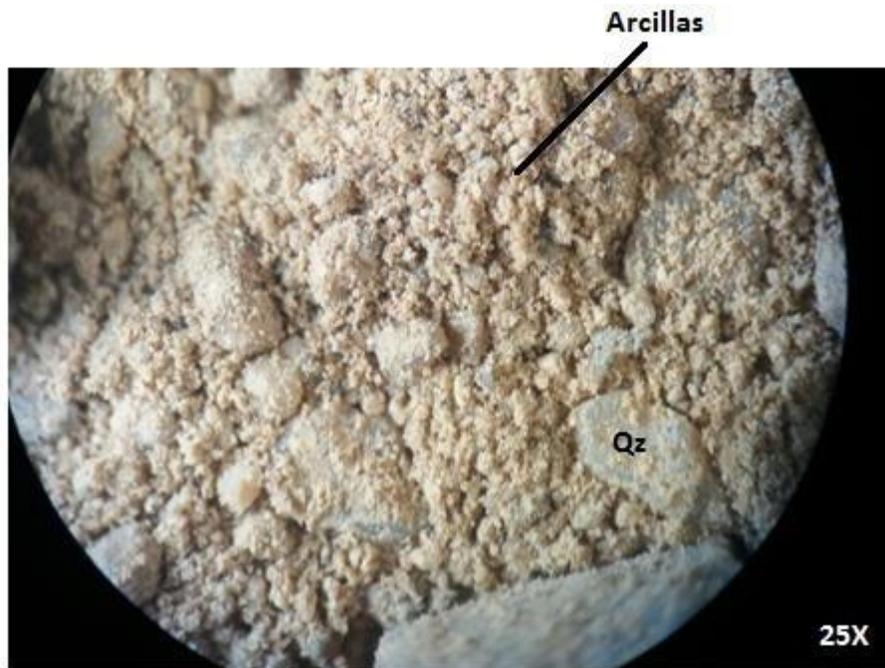


Figura 7.3: Muestra en profundidad de suelo con severidad baja con un aumento de 25X con la que es posible diferenciar la arcilla cubriendo los cristales de cuarzo.



Figura 7.4: Suelo de severidad baja en profundidad en el que destacan los colores marrones amarillentos sin la presencia de materia orgánica carbonizada.

- Muestra superficial severidad intermedia de incendio: P2 A

Muestra constituida principalmente por cuarzo y materia orgánica quemada, con presencia importante de arcillas y en menor proporción de minerales magnéticos negros (que podría ser magnetita) y micas blancas (moscovita), algunas de estas presentan alteración mostrando colores amarillentos. Muestra bien seleccionada donde la mayoría de los granos y cristales no superan los 0,5 mm. Los colores varían entre marrón oscuro y negro, estos últimos dados principalmente por el material carbonizado por las llamas.

La consistencia de este suelo es prácticamente nula ya que los agregados son muy escasos, sin embargo, los pocos que existen son bastante firmes al contacto con los dedos mientras que al tacto de muy suave lo que nos hablaría de un textura franco-limosa en primera instancia (Ciancaglini, sf).

- **Magnetismo:** Muy marcado y en mayor cantidad que en la zona de severidad baja.

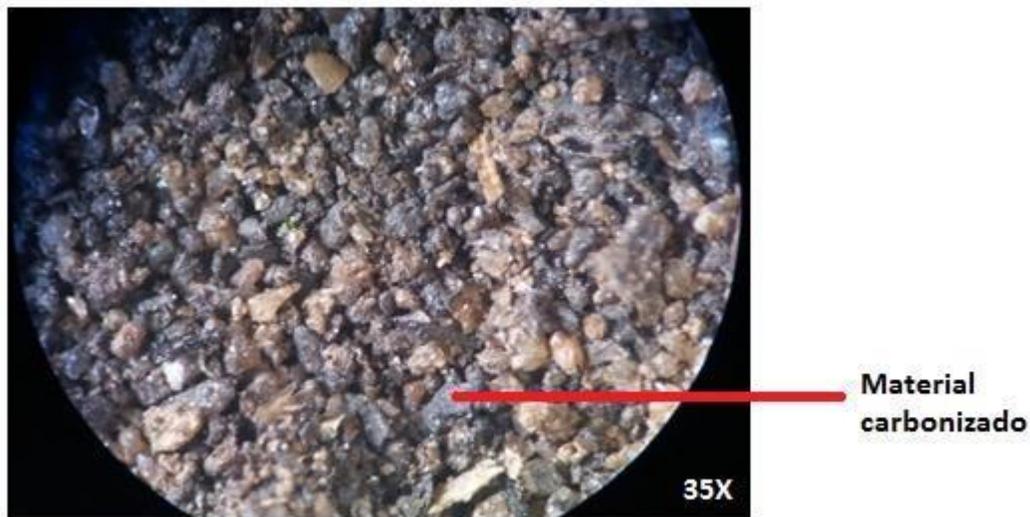


Figura 7.5: Muestra superficial severidad intermedia con un aumento de 35X donde se puede apreciar la forma y selección de los granos presentes.



Figura 7.6: Muestra superficial severidad intermedia con aumento de 17X donde se aprecian los escasos agregados presentes (izquierda). Mientras que la imagen derecha ilustra la presencia de minerales magnéticos del suelo estudiado.



Figura 7.7: Suelo de severidad moderada con predominio de colores negros y grises, lo que es una señal del paso de las llamas en el sector.

- Muestra en profundidad severidad intermedia de incendio: P2 B

Muestra compuesta principalmente de cuarzo, arcillas y algunas micas blancas, bien seleccionada de color marrón claro y partículas subredondeadas a subangulosas mayoritariamente. La presencia de materia orgánica es prácticamente nula a simple vista. Poca presencia de minerales magnéticos.

El cuarzo se manifiesta con colores que varían entre el blanco y el marrón, siendo esto último el predominante y el que le otorga la tonalidad final a este suelo.

Los pocos clastos que superan el mm se encuentran cubiertos por los granos de menor tamaño (adherencia de partículas).

La consistencia de la muestra es prácticamente nula, debido a la carencia de agregados. Mientras que es suave al tacto lo que permitiría otorgarle una clasificación franco-limosa en primera instancia (Ciancaglini, sf).

- **Magnetismo:** Débil, pero existe y con una cantidad de clastos mucho menor que el suelo en superficie.

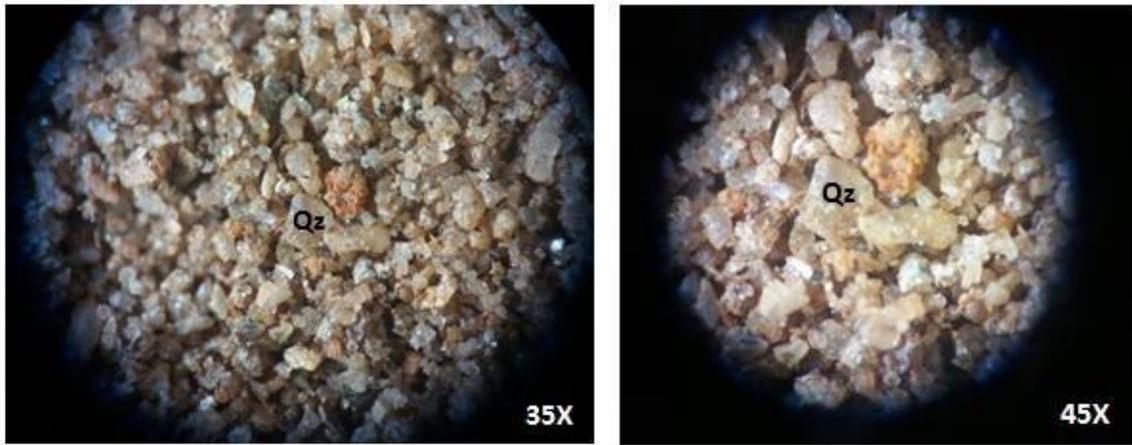


Figura 7.8: Muestra en profundidad (15- 20 cm aproximadamente) severidad intermedia con aumento de 35X (izquierda) y 45X (derecha). Se puede apreciar la abundancia de granos de cuarzo ($\ll 1$ mm) irregulares y subangulares con clastos de material arcilloso.



Figura 7.9: Suelo de severidad moderada en profundidad donde es posible apreciar el predominio de colores marrones amarillentos.

- Muestra en profundidad severidad alta de incendio: P4 B

Muestra medianamente seleccionada de tonalidades marrones amarillentos y rojizas oscuras con abundantes clastos de arcilla (<< 1 mm), con menor presencia de cristales de cuarzo transparente. Casi nula moscovita y minerales magnéticos en este suelo. Clastos angulosos y subangulosos principalmente.

Los clastos de arcilla de menor tamaño se encuentran unidos a clastos de mayor envergadura. Adicionalmente algunas de las partículas arcillosas conforman agregados que pueden llegar hasta los 4 mm pero que no superan el 5 % total de la muestra.

De consistencia ligeramente dura, ya que los agregados son capaces de soportar una pequeña presión con los dedos. Adicionalmente, la muestra es áspera al tacto lo que sugeriría una clasificación franca arenosa en primera instancia (Mery, 1980) (Ciancaglini, sf).

- **Magnetismo:** Muy fuerte y marcado al igual que la muestra en superficie.



Figura 7.10: Muestra en profundidad severidad alta de incendio con aumento de 20X (izquierda) y 45X (derecha). Se notan la forma angulosa de los clastos de arcilla y cuarzo principalmente.



Figura 7.11: Suelo en profundidad zona de severidad alta con claro predominio de colores rojizos y marrones amarillentos

- Muestra testigo en superficie: P5 A

Muestra mal seleccionada de color marrón amarillento claro, compuesta mayoritariamente por arcillas y en menor proporción por cuarzo. Material orgánico de color negro, sin presencia de minerales magnéticos. Clastos subangulares y subredondeados, de tamaño arena y limo principalmente, con dimensiones que van desde los 3 mm a envergaduras bastantes más pequeños al mm, siendo estos últimos los que predominan en la muestra.

Abundante presencia de agregados de arcilla. Los clastos de tamaño arcilla se encuentran adheridos, en grandes cantidades, a granos de mayor tamaño.

De consistencia dura mayoritariamente, salvo algunos agregados que se disgregaron con facilidad, pero la mayor parte apenas sufrieron daños al aplicarles presión con los dedos. Estas cualidades clasifican este suelo como franco arcilloso (Mery, 1980) (Ciancaglini, sf).

- **Magnetismo:** Nulo

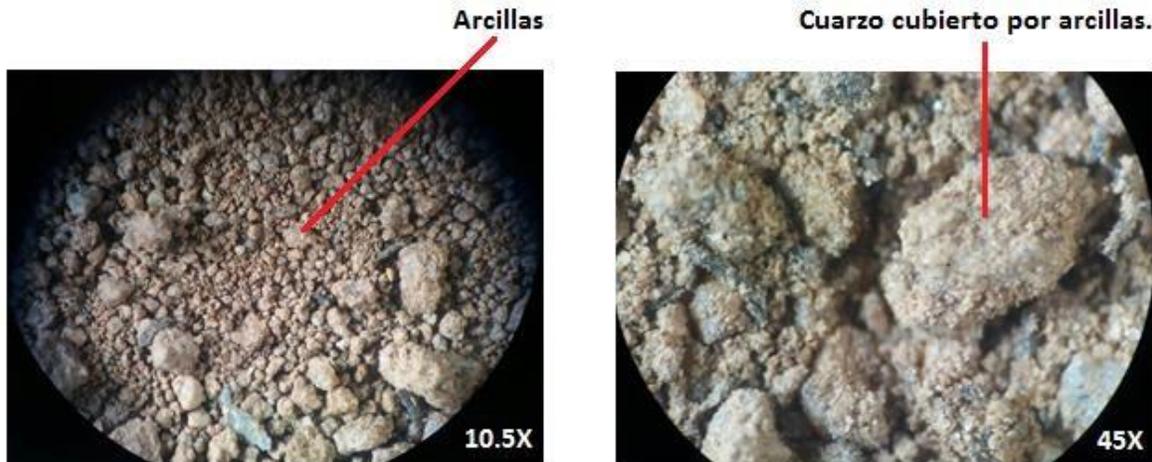


Figura 7.12: Muestra testigo superficial con aumento de 10.5X (izquierda) y 45X (derecha). Se puede apreciar la forma de los clastos (tanto de arcilla como los pocos de cuarzo) y como los granos tamaño arcilla se adhieren a otros de mayores dimensiones.



Figura 7.13: Muestra testigo superficial con colores marrones amarillentos mayoritariamente.

- Muestra testigo en profundidad: P5 B

Muestra mal seleccionada de tonalidades marrones amarillentos clara, muy parecida a la muestra en superficie, pero en este caso los colores son un poco más claros y vivos, compuesta principalmente de arcillas con una menor proporción de cuarzo y prácticamente nula presencia de minerales magnéticos (salvo unos pocos clastos). Se trata de un suelo bastante similar al obtenido en superficie, los clastos son subangulares y subredondeados y van desde los 2 mm a dimensiones mucho menores al mm.

Sin presencia de materia orgánica, algunas arcillas toman tonos rojizos alrededor de los 20 cm de profundidad y tienden a formar una gran cantidad de agregados (aunque en menor cantidad que en superficie) que llegan hasta los 3 cm de diámetro.

De consistencia dura, ya que los agregados resisten una gran presión de los dedos, y una textura áspera al pulverizar los agregados. Estas características caen dentro de la clasificación franco-arcillosa (Mery, 1980) (Ciancaglini, sf).

- **Magnetismo:** Nulo

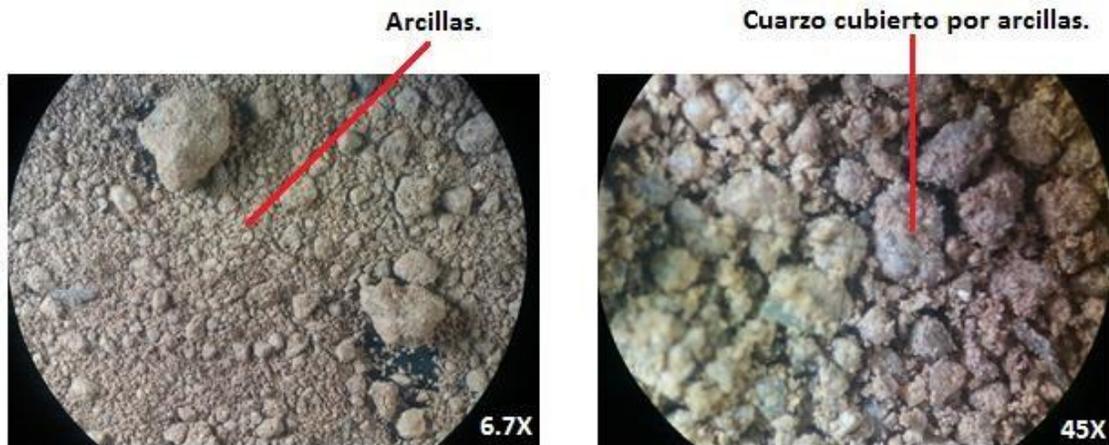


Figura 7.14: Muestra testigo en profundidad con aumento de 6.7 (izquierda) y 45X (derecha) donde se pueden apreciar los agregados de arcilla y como los clastos arcillosos más pequeños se adhieren a los de mayor envergadura, además de los minerales de cuarzo y la forma que poseen los granos.



Figura 7.15: Muestra testigo en profundidad. Muy similar al suelo en superficie, pero aquí las tonalidades son más "vivas".

Anexo B: Secado de muestras.

Antes de realizar los ensayos de laboratorio, era necesario secar los suelos extraídos para poder calcular el porcentaje de agua presente y ver la influencia de la humedad sobre las muestras, en especial las que fueron afectadas directamente por las llamas del incendio.

Los materiales utilizados para el procedimiento fueron los siguientes:

- Platos de cerámica de diferente peso y tamaño. (Figura 7.16)
- Balanza de precisión 0,1 gr.
- Horno de secado Marca Memmert (Figura 7.16).
- Brocha y cuchara de metal.

Para el procedimiento se separó alrededor de unos 150 gr de cada muestra en pocillos de cerámica, dependiendo del volumen de las muestras (los pocillos fueron pesados previamente). El secado se realizó mediante el horno, a una temperatura constante de 27°C+2, por un tiempo aproximado de 7 días. Transcurrido el tiempo se procedió a pesar las muestras en intervalos de 2 horas. Una vez que la diferencia entre los pesos de la misma muestra varía menos de un 0.1%, se determina que la muestra ha alcanzado una masa constante (Zagal y Sadzawka, 2007), y se extrae para análisis posteriores.

La humedad de un suelo en base al peso de la muestra seca (MOP, 1985) se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{M_{\text{Muestra húmeda}} - M_{\text{Muestra seca}}}{M_{\text{Muestra seca}}} \times 100 = \text{Contenido de humedad de la muestra.}$$



Figura 7.16: Implementos utilizados en proceso de secado de muestras. A la izquierda se observa el horno marca Memmert utilizado, a una temperatura aproximada de 27°C. A la derecha se observan las muestras de unos 150 gr aproximadamente de peso. Las muestras han sido etiquetadas previamente, registrando el código de la muestra.

Muestra	Peso recipiente (gr)	Peso muestra + recipiente (gr) (Día 1)	Peso muestra + recipiente (gr) (Día 8)	Peso muestra húmeda (gr)	Peso muestra seca (gr)
P1-A	256,73	408,41	407,2	151,68	150,47
P1-B	256,95	410,51	409,06	153,56	152,11
P2-A	255,31	402,98	402,13	147,67	146,82
P2-B	256,69	409,21	404,75	152,52	148,06
P4-A	257,15	408,98	406,61	151,83	149,46
P4-B	253,81	409,75	397,75	155,94	143,94
P5-A	293,25	410,66	408,52	117,41	115,27
P5-B	303,56	410,02	401,82	106,46	98,26

Tabla 7.1: Pesos de las muestras una vez puestas a secar en el horno.

Muestra	Contenido de humedad (%)
P1-A (Severidad baja)	0,80
P1-B (Severidad baja)	0,95
P2-A (Severidad intermedia)	0,58
P2-B (Severidad intermedia)	3,01
P4-A (Severidad alta)	1,59
P4-B (Severidad alta)	8,34
P5-A (Muestra testigo)	1,86
P5-B (Muestra testigo)	8,35

Tabla 7.2: Contenido de humedad de las muestras extraídas en terreno.

Anexo C: Resultados granulometría.

Los resultados de granulometría están basados en el peso total del material obtenido luego del tamizaje. Las siguientes tablas muestran el material que pasa a través de cada tamiz.

a) Muestras superficiales

Tamiz	3/8	4	8	10	30	40	50	100	200
Muestra									
P1-A (Severidad baja)	100,00	99,22	87,91	82,68	51,66	45,10	40,07	31,00	23,23
P2-A (Severidad intermedia)	100,00	99,16	98,44	98,18	93,80	89,30	80,97	38,94	17,25
P4-A (Severidad alta)	100,00	98,68	95,94	94,76	75,79	68,54	62,30	43,44	29,41
P5-A (Muestra testigo)	100,00	98,97	97,21	96,36	85,93	79,68	73,18	57,86	44,17

Tabla 7.3: Granulometría muestras superficiales.

b) Muestras en profundidad.

Tamiz	3/8	4	8	10	30	40	50	100	200
Muestra									
P1-B (Severidad baja)	100,00	94,23	79,43	75,40	51,67	45,89	40,82	31,46	23,74
P2-B (Severidad intermedia)	100,00	99,96	99,93	99,89	97,87	95,62	89,44	36,72	11,29
P4-B (Severidad alta)	100,00	95,45	92,97	92,23	83,67	79,14	73,98	55,70	41,13
P5-B (Muestra testigo)	100,00	98,99	97,35	96,65	89,03	83,90	78,94	66,65	55,18

Tabla 7.4: Granulometría muestras en profundidad.

Anexo D: Clasificación Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)

Mediante los resultados de granulometría y límites de Atterberg, se clasifican las muestras de suelos dependiendo de su tamaño de grano, uniformidad, curvatura y comportamiento plástico/líquido (MOP, 1985).

Para la clasificación de suelos de grano grueso (más del 50% retenido en el tamiz N°200 (0.075 mm)) el procedimiento es el siguiente:

- La muestra debe ser clasificada como grava (G), si el 50%, o más de la fracción gruesa (>0,08 mm) es retenida en el tamiz 5 mm, o clasificada como arena (S), si más del 50% de la fracción gruesa (>0,08 mm) pasa por el tamiz 5 mm.
- Si menos del 5% en peso de la muestra pasa por el tamiz 0,08 mm se procede a calcular el Coeficiente de Uniformidad (Cu) y el Coeficiente de Curvatura (Cc).
- Luego se clasifica la muestra como grava bien graduada (GW), o arena bien graduada (SW), si Cu es mayor que 4 para las gravas y mayor que 6 para las arenas, y Cc está comprendido entre 1 y 3. Si no satisfacen estos requerimientos, la muestra se clasifica como grava pobremente graduada (GP) o arena pobremente graduada (SP) respectivamente.
- En caso de que la fracción fina sea más de 12%, se procede a clasificar como grava limosa (GM), o arena limosa (SM), si los resultados de los límites de consistencia muestran que los finos son limosos, si límite líquido vs índice de plasticidad está bajo la Línea "A", o si índice de plasticidad es menor que 4. En caso contrario, si los finos son de tipo arcilloso, es decir, límite líquido vs índice de plasticidad está sobre la Línea "A" e IP es mayor que 7, la muestra se clasificará como grava arcillosa (GC) o arena arcillosa (SC).
- Si el punto cae sobre la Línea "A" y el IP está entre 4 y 7, llevará clasificación doble (GM-GC o SM-SC).
- En caso de que la fracción fina se encuentre entre 5% y 12%, la muestra llevará clasificación doble (tomando la primera clasificación relacionada a

Cu/Cc, y la segunda a su tipo de finos, ej: GW-GM, GW-GC, etc).

Para la clasificación de suelos de grano fino (más del 50% pasa por el tamiz nº200 (0.075 mm)) el procedimiento es el siguiente:

- Se procede a clasificar como limo (M) si los resultados de los límites de consistencia muestran que los finos son limosos, si límite líquido vs índice de plasticidad está bajo la Línea "A", o si índice de plasticidad es menor que 4. En caso contrario, si los finos son de tipo arcilloso, es decir, límite líquido vs índice de plasticidad está sobre la Línea "A" e IP es mayor que 7, la muestra se clasificará como arcilla (C).
- La plasticidad vendrá dada por el límite líquido, si es mayor a 50 será definida de alta plasticidad (H) y caso contrario como baja (L).
- Otro factor a considerar es la presencia o no de materia orgánica, la que otorgara el carácter de orgánica (O) o inorgánica (no se agrega símbolo) al suelo en cuestión.

a) Muestras superficiales.

Muestra	D10	D30	D60	Cu	Cc	Límite Plástico	Límite líquido	Clasificación	Nombre
P1-A	0,05	0,14	0,73	-	-	-	31,977	SM	Arena limosa
P2-A	0,01	0,03	0,23	-	-	-	25,406	SM	Arena limosa
P4-A	0,01	0,05	0,32	-	-	-	43,822	SM	Arena limosa
P5-A	0,002	0,009	0,128	-	-	21,220	28,097	SM-SC	Arena limosa- Arena arcillosa

Tabla 7.5: Clasificación de suelo superficiales (USCS).

b) Muestras en profundidad.

Muestra	D10	D30	D60	Cu	Cc	Límite Plástico	Límite líquido	Clasificación	Nombre
P1-B	0,04	0,14	0,81	-	-	-	18,514	SM	Arena limosa
P2-B	0,01	0,03	0,22	-	-	-	25,406	SM	Arena limosa
P4-B	0,002	0,011	0,151	-	-	15,532	33,026	SC	Arena arcillosa
P5-B	0,0002	0,0019	0,0523	-	-	21,238	33,464	SC	Arena arcillosa

Tabla 7.6: Clasificación de suelos en profundidad (USCS).

7.4.1 Diámetro característico.

Diámetro característico.	P1-A	P1-B	P2-A	P2-B	P4-A	P4-B	P5-A	P5-B
D ₁₀	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0,002	0,002	0,0002
D ₃₀	0,14	0,14	0,03	0,03	0,05	0,011	0,009	0,0019
D ₆₀	0,73	0,81	0,23	0,22	0,32	0,151	0,128	0,0523

Tabla 7.7: Diámetro característico de muestras superficiales (A) y en profundidad (B).

7.4.2 Coeficientes de curvatura y uniformidad.

Coeficiente	P1-A	P1-B	P2-A	P2-B	P4-A	P4-B	P5-A	P5-B
C _u	15,47	19,05	25,40	23,42	26,64	81,12	76,87	240,68
C _c	0,58	0,55	0,52	0,53	0,52	0,42	0,42	0,33

Tabla 7.8: Coeficientes de curvatura (C_c) y uniformidad (C_u) de muestras superficiales (A) y en profundidad (B).

Anexos E: Espectros FTIR

a) Muestra superficiales.

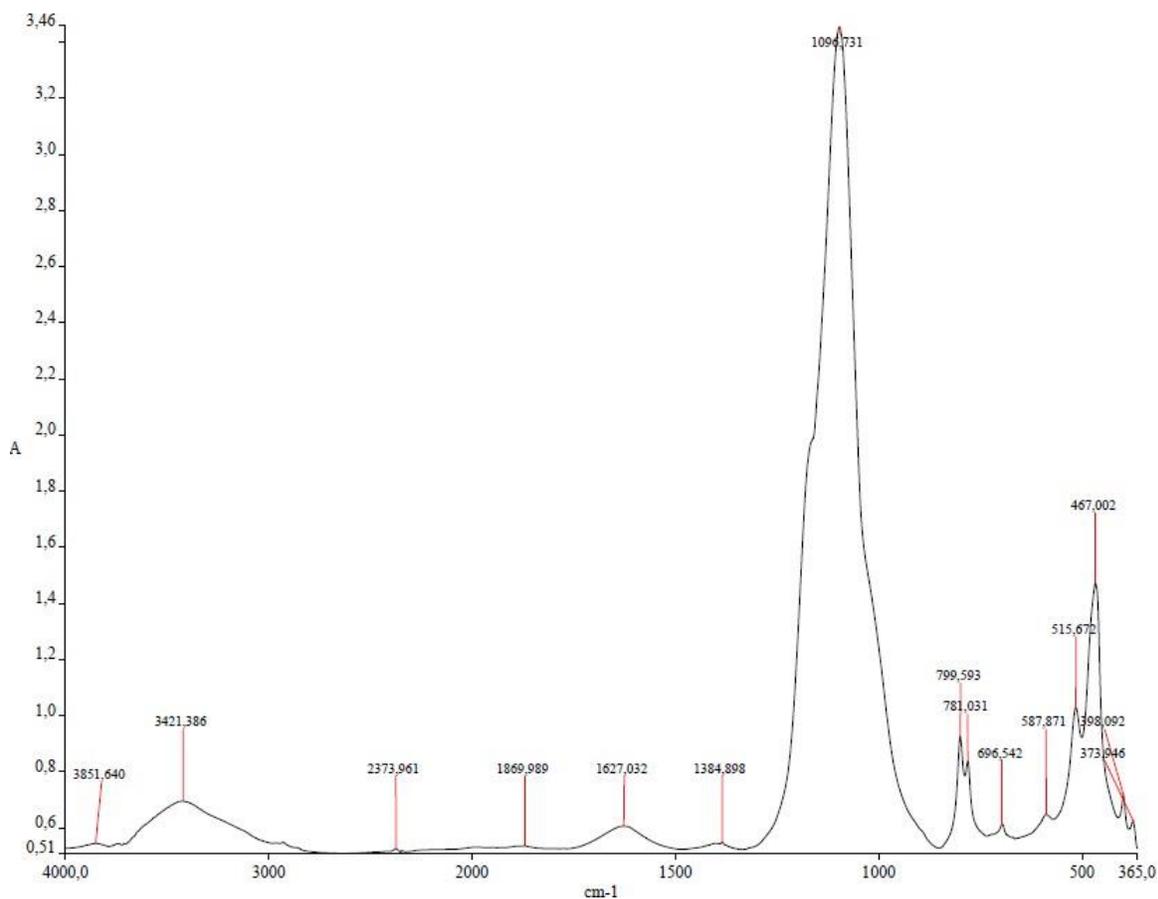


Figura 7.17: Espectro de muestra de severidad intermedia (P2-A).

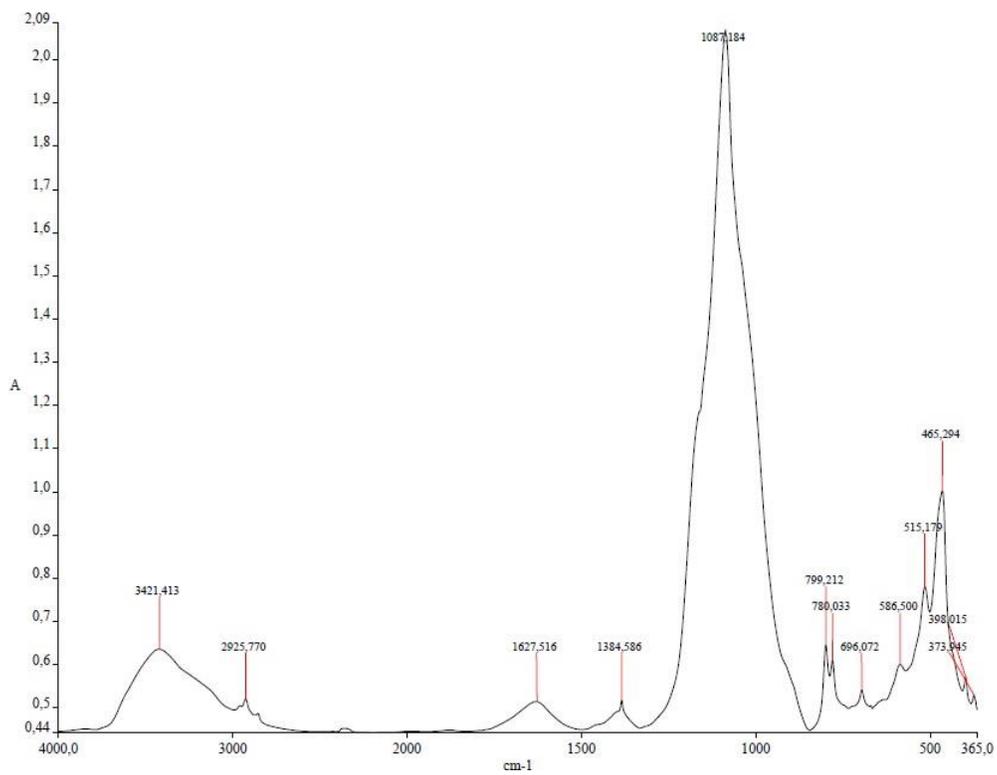


Figura 7.18: Espectro de muestra de severidad alta (P4-A).

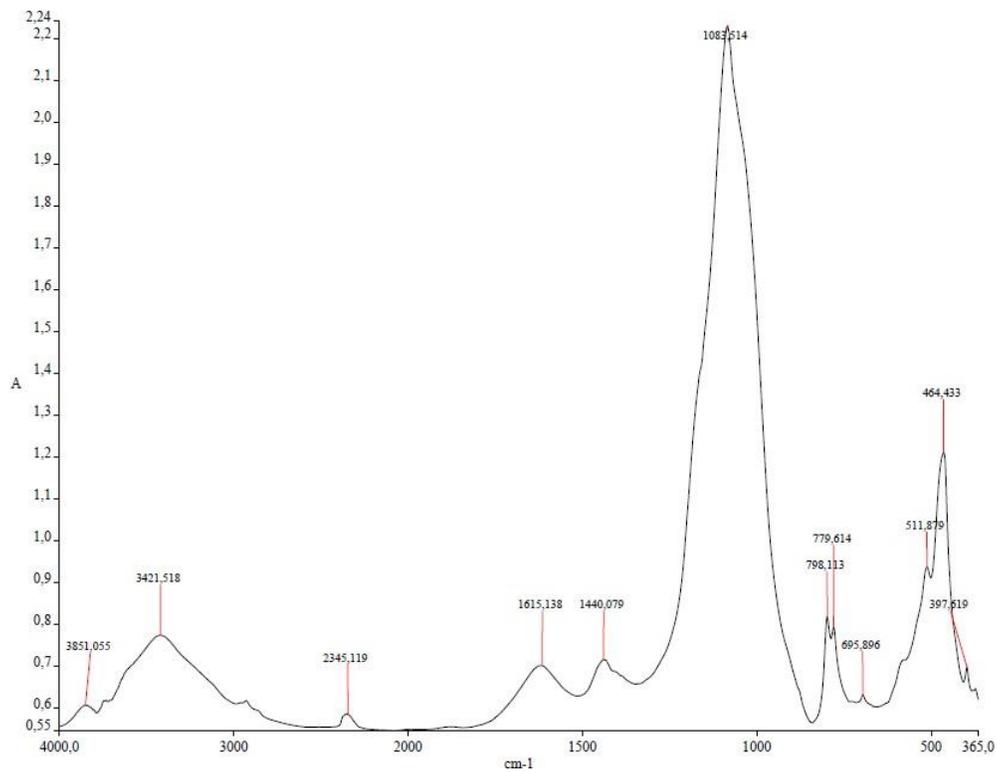


Figura 7.19: Espectro de muestra testigo (P5-A).

b) Muestras en profundidad.

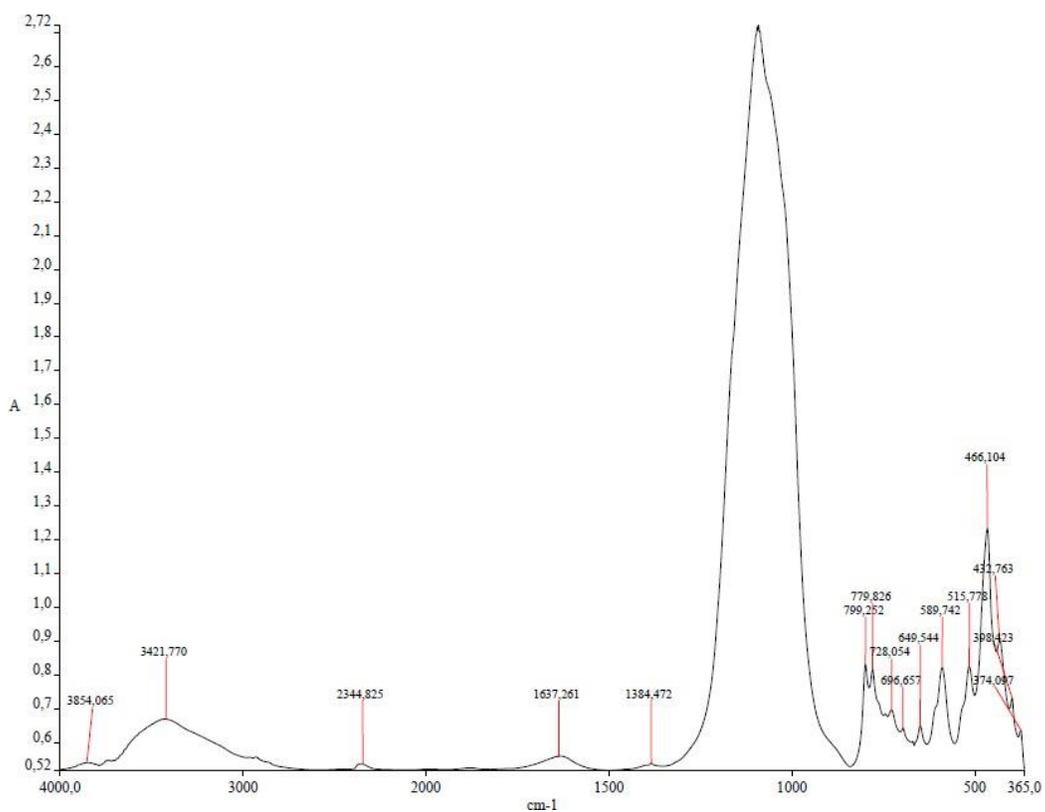


Figura 7.20: Espectro de muestra severidad baja (P1-B).

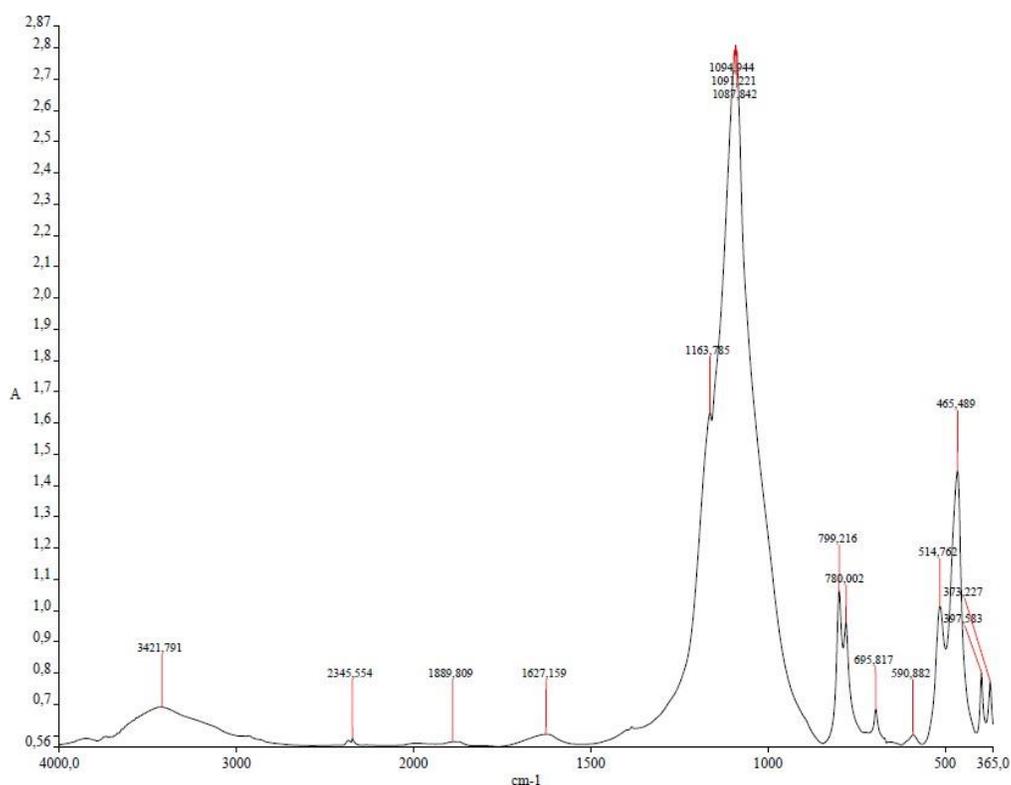


Figura 7.21: Espectro de muestra severidad intermedia (P2-B).

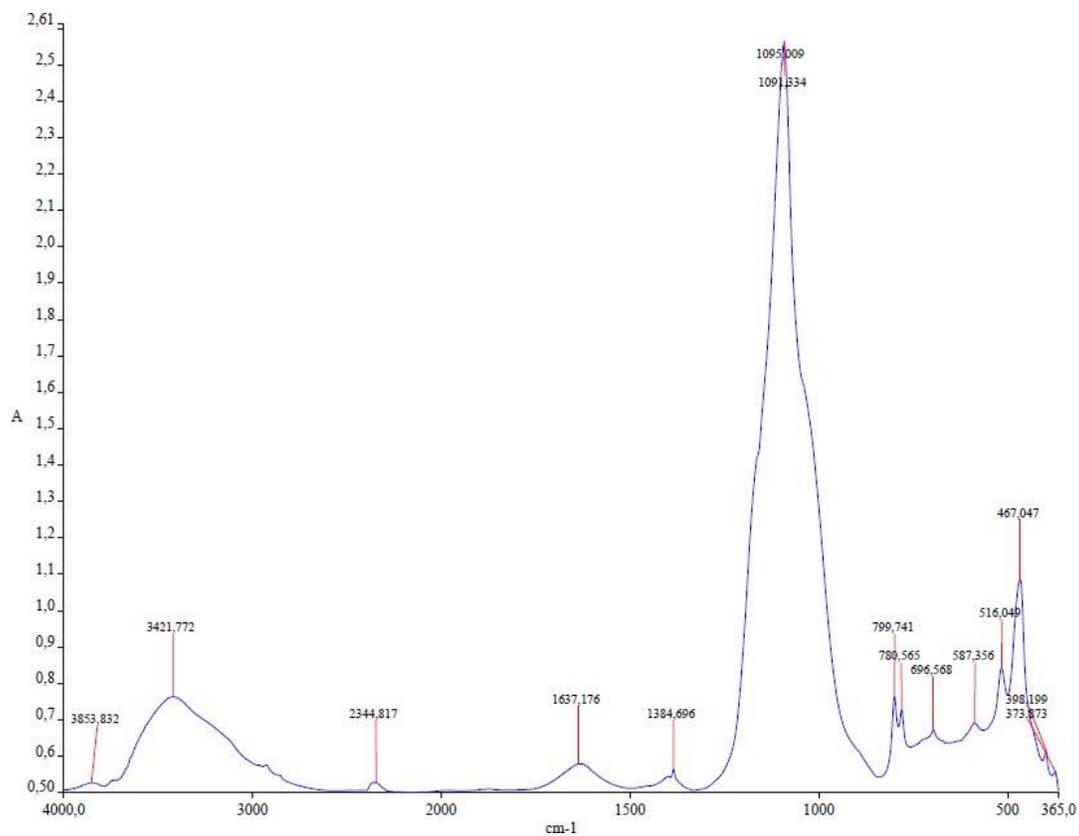


Figura 7.22: Espectro de muestra severidad alta (P4-B).

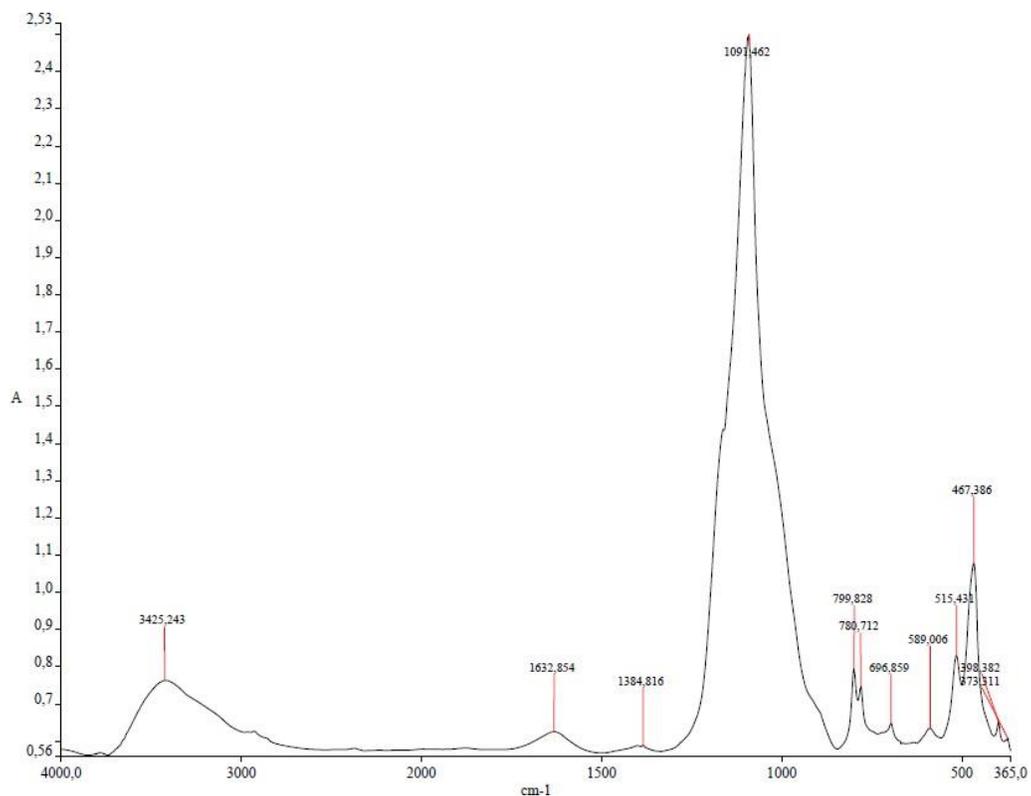


Figura 7.23: Espectro de muestra testigo (P5-B).

Anexo F: Clasificación taxonómica de la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos)

La taxonomía de suelos de USDA es una clasificación de suelos en función de varios parámetros y propiedades que se desarrolla en niveles: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia, y Serie (Fao, sf).

Existen 12 tipos de órdenes de suelo, descritos por la USDA: Alfisol, Andisol, Aridisol, Entisol, Espodosol, Gelisol, Histosol, Inceptisol, Mollisol, Oxisol, Ultisol y Vertisol (Figura 7.24) (Solís, 2004).



Figura 7.24: Ordenes de suelo según la USDA. (Modificado de Solís, 2004).

Dado que en este estudio solo se trabajó con alfisoles, solo se entrará en detalle en este tipo de suelo.

- **Alfisoles:** Son suelos típicos de zonas con cambios estacionales entre húmedo a semiárido, con déficit de humedad de más de cinco meses al año. Poseen buen contenido de cationes intercambiables pero alta susceptibilidad a los procesos de degradación. Presentan un horizonte superficial de color claro con bajo contenido de materia orgánica (Solís, 2004).

Debido a que toda la zona de estudio presenta suelos del tipo alfisol es que se entró al detalle de los Grandes Grupos para establecer diferencias:

- a) Xeralfs: Alfisol que presenta un régimen argílico y un duripán (capa de suelo endurecido irreversiblemente) dentro de los primeros 100 cm desde la superficie (Solís, 2004).
- b) Rodoxeralfs: Alfisol con horizonte de iluviación, proceso de acumulación en un horizonte de suelo, de color rojo (Solís, 2004).

Anexo G: Clasificación textural de la USDA.

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa (FAO, sf).

Existen varias escalas de clasificación de texturas, pero una de las más utilizadas es la americana, conocida como triángulo de texturas (Figura 7.25). Las líneas trazadas en el triángulo (paralelas a los lados), fijan los límites porcentuales de cada componente (Arcilla, limo y arena) (Mery, 1980). Por ejemplo, si un suelo contiene 60 % de arena, 30 % de limo y 10 % de arcilla corresponde a una textura franca arenosa. En cambio, si el porcentaje de arcilla se incrementa, 30 %, el limo al 40 % y la arena también 40 %, la textura es Franco arcillosa.

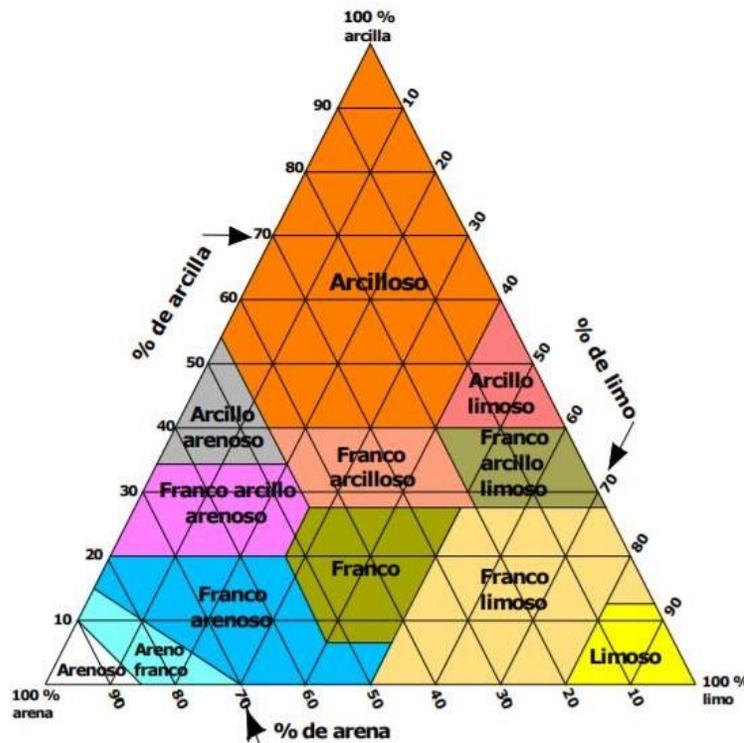


Figura 7.25: Triángulo textural de USDA (Modificado de Mery, 1980)

Existen diversas técnicas para determinación de texturas, una de las más simples es mediante la sensación al tacto y apariencia que tienen el suelo en análisis. El detalle se encuentra en la Tabla 7.9:

Textura	Apariencia y sensación	
	Suelo seco	Suelo húmedo
Arenosa	Suelta granos simples que se sienten ásperos. Cuando se aprieta el suelo entre los dedos, la masa se desintegra.	No se puede formar una bola (se disgrega). No forma cinta cuando se pasa entre el dedo pulgar e índice. Sensación al tacto: Muy áspera
	Semejanza: Arena de construcción	
Arenosa franca	Al tacto es áspero pero con la sensación de presencia de partículas más finas. Si se deja caer se dispersan partículas muy finas que las vuela la brisa o el viento.	Forma una bola que se disgrega cuando se toca. No forma cinta cuando se pasa entre el dedo pulgar e índice. Al tacto es áspero. Al secarse el suelo en los dedos se observa un color beige o blanquecino.
	Semejanza: Suelos típicos en médanos y dunas	
Franco arenosa	Se rompe fácilmente. Al principio la textura aparece suave, pero a medida que se frota, empieza a dominar una sensación arenosa.	Forma una bola que permite una manipulación cuidadosa sin romperse. Forma una cinta de hasta 3 cm de largo. Cuando se frota entre los dedos pulgar e índice es suave al principio pero al frotar domina una sensación más áspera
	Semejanza: Material de bordos de canales (por efecto de la monda)	
Franca	Los agregados se rompen bajo presión moderada. Los terrones pueden ser firmes. Cuando se pulveriza, la sensación al tacto no es ni suave ni áspera que se torna arenosa a medida que se frota.	Forma una bola que puede ser manipulada suavemente sin que se desintegre. Forma una cinta de hasta 3 cm de largo. Al tacto no se percibe ni suave ni áspero.
Franco limosa	Los agregados son muy firmes, pero se pueden romper bajo presión moderada. Los terrones son de firmes a duros. Cuando el suelo es pulverizado, la sensación al tacto es suave similar al talco o la harina.	Forma una bola que puede ser manipulada sin que se rompa. Forma una cinta de hasta 3 cm de largo. Cuando se frota entre el pulgar y el índice la sensación es suave.
Franco arcillosa	Agregados muy firmes y duros, resistentes a dejarse romper con la mano. Cuando se pulveriza, el suelo presenta una sensación áspera al tacto, debido a los pequeños agregados que persisten.	Un molde de este suelo es muy maleable. Se puede formar una cinta de hasta 5 cm de largo. Cuando se frota entre el pulgar y el índice, forma una cinta que no se siente ni suave ni áspero.

Franco Arcillo limosa	Agregados firmes y duros, resistentes a dejarse romper con la mano. Cuando se pulveriza, la sensación al tacto es suave	Un molde de este suelo es muy maleable. Se puede formar una cinta de hasta 5 cm de largo Cuando se frota entre el pulgar y el índice, se siente suave.
Arcillo limosa Arcillosa	Agregados de consistencia dura muy resistentes a dejarse romper con la mano. Cuando se pulverizan se perciben muy suaves.	Un molde de este material resiste considerablemente la manipulación. Se pueden formar cintas flexibles de mas de 5 cm de largo sin romperse. Cuando se frota entre el índice la sensación es muy suave al tacto. En los netamente arcillosos la sensación es plástica.

Tabla 7.9: Guía resumen para la determinación al tacto para diferentes clases texturales (Modificado de Mery, 1980).