

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

PROGRAMA DE MAGISTER EN CIENCIAS, MENCIÓN QUÍMICA

Influencia de las ceras cuticulares sobre la inflamabilidad de especies nativas del bosque esclerófilo de Chile

Carla Daniela Hernández Valencia

Magíster en Ciencias mención Química

Abril 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Influencia de las ceras cuticulares sobre la inflamabilidad de especies nativas del bosque esclerófilo de Chile

Nombre del candidato(a): Carla Daniela Hernández Valencia

Carrera / Grado: Magíster en Ciencias mención Química

Campus: Casa Central- Valparaíso **Departamento:** Química

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Dr. Lautaro Taborga, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 21/08/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha:

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

PROGRAMA DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN QUÍMICA

Influencia de las ceras cuticulares sobre la inflamabilidad de especies nativas del bosque esclerófilo de Chile

Tesis de Grado presentada por

Carla Daniela Hernández Valencia

Como requisito parcial para optar al grado de

Magíster en Ciencias, mención Química.

Profesor Guía: Dr. Lautaro Taborga
Co-director: Dr. Fabián Guerrero

Abril 2026

PROGRAMA DE MAGISTER EN CIENCIAS, MENCIÓN QUÍMICA

TÍTULO DE LA TESIS:

Influencia de las ceras cuticulares sobre la inflamabilidad de especies nativas del bosque esclerófilo de Chile.

AUTOR:

CARLA DANIELA HERNÁNDEZ VALENCIA

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de Magíster en Ciencias, mención Química de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Lautaro Taborga

Dra. Melisa Blackhall

Dr. Luis Espinoza

Dr. Jan Bergmann

Dr. Mauricio Osorio

Valparaíso, Chile. Marzo de 2026

Agradecimientos...

Extiendo mi gratitud al financiamiento otorgado por el proyecto FONDECYT Regular 1231580 y al apoyo de la Universidad Técnica Federico Santa María mediante la Beca PIIC.

A mi profesor guía y co-guía, Dr. Lautaro Tabora y Dr. Fabián Guerrero, por su orientación, paciencia y por guiarme con su experiencia en el estudio de la inflamabilidad y química vegetal.

A la Dra. Melisa Blackhall y Dra. Carolina Quintero por abrirme las puertas del Instituto INIBIOMA en Bariloche, Argentina. Gracias por su invaluable disposición, por sus enseñanzas y por guiarme durante mi pasantía enfocada en el estudio de la inflamabilidad.

Mi profunda gratitud a mi equipo de trabajo, ECIFA. Gracias por el compañerismo, el apoyo técnico en nuestras investigaciones y por hacer del trabajo colaborativo una experiencia verdaderamente enriquecedora. Este logro también es de ustedes.

A nivel personal agradezco a mi familia, gracias infinitas por ser mi pilar incondicional, por su contención y por darme la fuerza necesaria en los momentos más desafiantes.

A mis amigos, gracias por los momentos de desconexión, las risas, las palabras de aliento y por acompañarme siempre.

CONTENIDO

RESUMEN	3
SUMMARY	4
CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN	5
CAPITULO 2 – OBJETIVO DE INVESTIGACIÓN	10
2.1 HIPOTESIS	10
2.2 Objetivos Generales	10
2.3 Objetivos Específicos	11
CAPÍTULO 3 - PARTE EXPERIMENTAL Y METODOLOGIAS	12
Área de estudio	12
4.2 Recolección de muestra	12
4.3 Mediciones de Inflamabilidad	13
4.4 Extracción Química	13
4.5 Identificación y Cuantificación de Compuestos Químicos	14
4.6 Análisis del Contenido de Humedad	15
4.7 Análisis de datos	15
CAPITULO 5 – RESULTADOS	18
5.1 Mediciones de Inflamabilidad	18
5.2 Contenido de Ceras Cuticulares	24
5.3 Relación entre inflamabilidad y ceras cuticulares	29
CAPITULO 6 – DISCUSIÓN	32
Conclusión	37
REFERENCIAS	38
ANEXOS	43

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: TRIÁNGULO DEL FUEGO: INTERACCIÓN ENTRE COMBUSTIBLE, CALOR Y OXÍGENO.	6
FIGURA 2: CURVA CALIBRADO 1-OCTADECANOL.....	15
FIGURA 3: PORCENTAJE DE IGNICIÓN DE LAS ESPECIES.	18
FIGURA 4: TIEMPO DE IGNICIÓN DE LAS ESPECIES.....	19
FIGURA 5: DURACIÓN DE LLAMA DE LAS ESPECIES.	19
FIGURA 6: TIEMPO DE COMBUSTIÓN DE LAS ESPECIES.....	19
FIGURA 7: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) DE LOS PARÁMETROS DE INFLAMABILIDAD PARA LAS SEIS ESPECIES EN ESTUDIO, INCLUYENDO <i>ESCALLONIA PULVERULENTA</i>	22
FIGURA 8: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) DE LOS PARÁMETROS DE INFLAMABILIDAD PARA CINCO ESPECIES EN ESTUDIO, SIN <i>ESCALLONIA PULVERULENTA</i>	23
FIGURA 9: CERAS TOTALES.....	24
FIGURA 10: TOTAL ALCANOS	25
FIGURA 11: TOTAL NO-ALCANOS	25
FIGURA 12: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) DE LAS CERAS CUTICULARES.....	28
FIGURA 13: CORRELACIONES LINEALES PRINCIPALES ENTRE PARÁMETROS DE INFLAMABILIDAD Y CERAS CUTICULARES.	30
FIGURA 14: CORRELACIÓN ENTRE NONACOSANO Y DURACIÓN DE LLAMA (DLL).....	31
FIGURA 15: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN EXPONENCIAL PARA LA RELACIÓN ENTRE TOTAL CERAS Y TI. $R^2=0,4005$ AKAIKE=331,89.	43
FIGURA 16: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HILL PARA LA RELACIÓN ENTRE TOTAL NO-ALCANOS Y TI. $R^2=0,5641$, AKAIKE=247,39.	43
FIGURA 17: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HILL PARA LA RELACIÓN ENTRE 16-HENTRIACONTANONA Y TI. $R^2=0,646$, AKAIKE=203,15.....	44
FIGURA 18: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN EXPONENCIAL PARA LA RELACIÓN ENTRE TOTAL CERAS Y TC. $R^2=0,4032$, AKAIKE=3780,20.....	44
FIGURA 19: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HILL PARA LA RELACIÓN ENTRE TOTAL NO ALCANOS Y TC. $R^2=0,7293$, AKAIKE=1722,9.....	45
FIGURA 20: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HILL PARA LA RELACIÓN ENTRE 16-HENTRIACONTANO Y TC. $R^2=0,4032$, AKAIKE=3780,2.....	45

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE LOS PARÁMETROS DE INFLAMABILIDAD.....	20
TABLA 2: CLASIFICACIÓN DE LA INFLAMABILIDAD SEGÚN LA TABLA DE VALETTE (1990).....	20
TABLA 3: CORRELACIÓN DE SPEARMAN ENTRE COMPUESTOS Y CLASES DE COMPUESTOS QUÍMICOS.....	27

RESUMEN

A pesar de la creciente crisis global de incendios forestales, existe un área de la química vegetal que ha permanecido mayormente inexplorada en relación con la inflamabilidad: las ceras cuticulares. Las ceras cuticulares constituyen una fuente importante de compuestos químicos alifáticos de cadena larga (C_{20} y C_{34}), principalmente ácidos grasos y sus derivados como, alcoholes, aldehídos, cetonas y ésteres que podrían poseer propiedades que facilitan la ignición (puntos de inflamación relativamente bajos). Las ceras cuticulares representan un recubrimiento protector que actúan como un mecanismo adaptativo fundamental para tolerar el estrés biótico y abiótico, y actualmente sobre todo frente al cambio climático. Precisamente, las especies esclerófilas, se caracterizan por presentar un alto contenido de cera cuticular en sus hojas. El objetivo central de este estudio fue investigar la relación entre la inflamabilidad, y los rasgos químicos cuticulares de las hojas de especies nativas del bosque esclerófilo chileno. Nuestros principales resultados demuestran que una alta concentración de ceras cuticulares promueve la inflamabilidad, siendo la fracción de no-alcanos el principal contribuyente. La fracción de alcanos estuvo presente en la totalidad de las especies analizadas, constituyendo en promedio el 29% del contenido total de ceras. Esta fracción fue dominante en *Quillaja saponaria*, siendo el nonacosano y el heptacosano los compuestos químicos más representativos para todas las especies. En contraste, la fracción de no-alcanos representó la porción mayoritaria (71%), alcanzando sus máximos contenidos en *Persea lingue* y *Cryptocarya alba*. La inflamabilidad de las especies se clasificó en tres grupos, alta, media y baja. Se determinaron con una inflamabilidad alta *P. lingue* y *C. alba*, de perfiles químicos similares, caracterizados por una mayor concentración de ceras dominadas por no-alcanos, con la cetona (16-hentriacontanona) como compuesto clave. En contraste, las especies del grupo menos inflamable, *Q. saponaria* y *Colliguaja odorífera*, presentaron el menor contenido total de ceras. *Lithraea caustica* fue una especie de inflamabilidad intermedia con una alta diversidad de compuestos químicos. Dado que el bosque esclerófilo ha sido declarado como degradado y que está constantemente amenazado por los incendios forestales, la identificación de estos rasgos químicos inflamables en las especies nativas provee una respuesta científica esencial para mejorar la gestión del paisaje y la prevención de incendios en el ecosistema.

SUMMARY

Despite the growing global wildfire crisis, there is an area of plant chemistry that has remained largely unexplored in relation to flammability: cuticular waxes. Cuticular waxes constitute an important source of long-chain aliphatic chemical compounds (C₂₀ and C₃₄), mainly fatty acids and their derivatives such as alcohols, aldehydes, ketones, and esters, which could possess properties that facilitate ignition (relatively low flash points). Cuticular waxes represent a protective coating that acts as a fundamental adaptive mechanism to tolerate biotic and abiotic stress, particularly in the current context of climate change. Sclerophyllous species, in particular, are characterized by a high cuticular wax content in their leaves. The central objective of this study was to investigate the relationship between flammability and the cuticular chemical traits of leaves from native species of the Chilean sclerophyllous forest. Our main results demonstrate that a high concentration of cuticular waxes promotes flammability, with the non-alkane fraction being the main contributor. The alkane fraction was present in all the analyzed species, constituting on average 29% of the total wax content. This fraction was dominant in *Quillaja saponaria*, with nonacosane and heptacosane being the most representative chemical compounds across all species. In contrast, the non-alkane fraction accounted for the majority (71%), reaching its highest levels in *Persea lingue* and *Cryptocarya alba*. The flammability of the species was classified into three groups: high, medium, and low. *P. lingue* and *C. alba* were determined to have high flammability, showing similar chemical profiles characterized by a higher concentration of waxes dominated by non-alkanes, with the ketone (16-hentriacontanone) as a key compound. In contrast, the species in the least flammable group, *Q. saponaria* and *Colliguaja odorifera*, presented the lowest total wax content. *Lithraea caustica* exhibited intermediate flammability with a high diversity of chemical compounds. Given that the sclerophyllous forest has been declared degraded and is constantly threatened by wildfires, the identification of these flammable chemical traits in native species provides an essential scientific response to improve landscape management and fire prevention in the ecosystem.

CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales continúan representando una amenaza creciente en Chile y en el mundo [1, 2, 3]. La convergencia entre el cambio climático global y diversos factores antropogénicos ha contribuido al aumento en frecuencia y severidad de los incendios forestales, resultando en graves procesos de degradación a nivel ecológico, social y económico [3, 4]. Un ejemplo de esto fue la tragedia ocurrida en Chile durante la temporada 2017, donde se quemaron más de 500.000 h de bosque forestal y, recientemente, los mega-incendios de febrero de 2024 en Valparaíso, que se cuentan entre los más mortíferos del mundo del último siglo, causando la pérdida de 137 vidas humanas y evidenciando la vulnerabilidad de las zonas de interfaz urbano-forestal [5, 6]. La zona centro y centro sur de Chile posee un régimen de clima mediterráneo, condición climática que solo se encuentra en cinco regiones geográficas del mundo. Este ecosistema, conocido como el Bosque Esclerófilo Mediterráneo Chileno, es considerado un hotspot mundial de biodiversidad y se distingue por su alto valor endémico [7]. Sin embargo, la alta densidad poblacional, cambios en el uso de la tierra y en sus condiciones climáticas, atentan contra su biodiversidad; siendo la pérdida de hábitat y el riesgo de incendios las amenazas mayores. Este tipo de ecosistema mediterráneo presenta una condición climática que favorece el desarrollo de incendios forestales, especialmente en la temporada de verano, cuando las bajas precipitaciones y las altas temperaturas contribuyen a la desecación del combustible vegetal, lo que incrementa su inflamabilidad [8]. Diversos estudios sobre cambio climático en Chile advierten que estas tendencias podrían intensificarse en las próximas décadas, incrementando el riesgo de incendios en la región. En particular, los pronósticos sugieren que las temperaturas podrían aumentar entre 0,7°C y 1,3°C para mediados de siglo, mientras que las precipitaciones se reducirían entre un 10% y un 20% [9, 10].

Actualmente, el bosque esclerófilo chileno exhibe severos procesos de degradación ecosistémica. Un análisis de riesgo multifactorial reciente concluyó que este bosque se encuentra al borde del colapso, con un 39,8 % de sus rodales en condición de riesgo alto o muy alto [11]. Esta condición se evidencia mediante la disminución crítica del vigor de la vegetación (en un 90,9%) y la disminución en la producción de biomasa, un fenómeno conocido como 'pardeamiento', resultado directo de la sequía prolongada que se extiende desde 2010 [11, 12]. Además de los incendios forestales y la sequía, el bosque esclerófilo

chileno se enfrenta a la presión antropogénica derivada del cambio de cobertura terrestre, principalmente por el reemplazo de este por cultivos agrícolas y plantaciones forestales exóticas [11].

Efectivamente, para tolerar el estrés abiótico sostenido, como las sequías y las olas de calor, evolutivamente las plantas esclerófilas han desarrollado complejos mecanismos de adaptación fisiológica y bioquímica para mantener la eficiencia y la supervivencia [13]. Una estrategia clave involucra la síntesis y acumulación de metabolitos secundarios como los aceites esenciales, que desempeñan funciones cruciales en la defensa y adaptación al entorno [14]. Asimismo, muchos estudios asumen que estos compuestos químicos esenciales, contribuyen significativamente a la inflamabilidad y al riesgo de incendio del follaje debido a su alto valor energético y bajo punto de inflamación [15, 16, 17]. Bajo un escenario de incendio forestal, los terpenos (o aceites esenciales) se volatilizan rápidamente, generando una atmósfera rica en gases combustibles que favorece la ignición del follaje y la rápida propagación de la llama.

La inflamabilidad, definida como la susceptibilidad de la vegetación a iniciar un proceso de combustión, es una propiedad fundamental regida por factores fisicoquímicos de la vegetación [18]. El combustible, al ser uno de los tres elementos esenciales dentro del esquema del triángulo del fuego (Fig. 1), su estudio es clave, pues constituye el único componente del riesgo de incendio que puede ser gestionado activamente para reducir la amenaza.

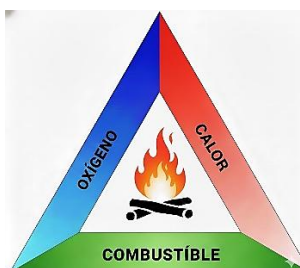


FIGURA 1: TRIÁNGULO DEL FUEGO: INTERACCIÓN ENTRE COMBUSTIBLE, CALOR Y OXÍGENO.

Las propiedades físicas de la vegetación más correlacionadas con el tiempo de ignición son el área foliar [19, 20], la relación superficie/volumen [21], grosor de las hojas [20, 22], el contenido de humedad [23, 24] y compuestos químicos [25]. Entre las propiedades químicas, los terpenos son los más citados [25]. No obstante, investigaciones recientes

en el ecosistema mediterráneo chileno subrayan que la inflamabilidad foliar debe evaluarse más allá del rol de los terpenos [26].

De hecho, para algunas especies esclerófilas chilenas se ha encontrado que la inflamabilidad está fuertemente influenciada por otros grupos de metabolitos secundarios, tales como cetonas, aldehídos, compuestos aromáticos y volátiles de hoja verde (GLV). En particular, se encontró que las concentraciones de estos compuestos fueron las que más fuertemente influyeron en la inflamabilidad foliar en un conjunto de especies nativas chilenas [26].

No obstante, existe un área de la química vegetal que ha permanecido mayormente inexplorada en relación con la inflamabilidad: las ceras cuticulares. Las ceras corresponden a un recubrimiento protector de la epidermis foliar que se ha desarrollado en las plantas como una estrategia adaptativa fundamental para tolerar el estrés biótico y abiótico [27]. Específicamente, las especies esclerófilas se caracterizan por presentar un alto contenido de ceras cuticulares en sus hojas [28, 29, 30]. Las ceras cuticulares constituyen una fuente importante de compuestos químicos alifáticos de cadena larga (C_{20} y C_{34}), principalmente ácidos grasos y sus derivados como alcanos, alcoholes primarios/secundarios, aldehídos, cetonas y ésteres que se acumulan en la parte más externa de las hojas [27]. A nivel metabólico, la biosíntesis de estos compuestos cerosos es un proceso celular altamente regulado que inicia en los plastidios con la síntesis de novo de ácidos grasos (C_{16} y C_{18}) y, posteriormente, estos precursores son exportados al retículo endoplasmático (RE), donde el complejo multienzimático elongasa de ácidos grasos (FAE) los alarga secuencialmente para formar ácidos grasos de cadena muy larga (VLCFAs, C_{20} - C_{34}) [27]. A partir de este punto, la maquinaria bioquímica se bifurca en dos rutas: la vía de reducción de acilos, que genera alcoholes primarios y ésteres; y la vía de descarbonilación, la cual transforma los VLCFAs en aldehídos para luego descarbonilarlos (pérdida de un carbono), formando alcanos de cadena impar y sus posteriores derivados oxidados (alcoholes secundarios y cetonas) [27]. Esta última ruta posee un fuerte control genético y hormonal, siendo un mecanismo central en la respuesta de la planta frente al estrés ambiental [27].

Los alcanos son el grupo de ceras más relevantes en la discusión sobre inflamabilidad porque están presentes en todas las plantas vasculares [31] y porque son considerados inflamables dado que poseen propiedades que facilitan la ignición (puntos de inflamación

relativamente bajo, los cuales oscilan entre 120°C y 356°C) [30]. Entre la multifuncionalidad fisiológica de las ceras cuticulares se incluyen la defensa contra la radiación UV, hongos e insectos, bajas temperaturas, alta salinidad, autolimpieza superficial y la regulación de la barrera de absorción. Sin embargo, su rol más crucial es limitar la transpiración cuticular [27, 31].

Se ha documentado que el estrés por sequía induce alteraciones en la cantidad y la composición de las ceras cuticulares en diversas especies [34]. Estas respuestas revelan un aumento en la cobertura total de cera y cambios en la composición de los metabolitos que evitan la pérdida de agua y mejoran la tolerancia a la sequía [30].

Se han abordado también estudios sobre la variabilidad intraespecífica de las ceras cuticulares, los cuales establecen el potencial de las ceras cuticulares como indicadores quimiotaxonómicos y proxys ambientales [35]. Bajo esta premisa, la composición química de las ceras puede utilizarse como un indicador de la inflamabilidad foliar, ya que variaciones en la composición química de las ceras podrían modificar la sensibilidad del combustible ante una fuente de calor, determinando que tan rápido puede encender la vegetación. Hasta el momento, la investigación de Ormeño [30] es el único trabajo que se ha centrado en la relación entre la inflamabilidad de las plantas y los rasgos fisicoquímicos de las plantas incluidas las ceras cuticulares. En este trabajo, los autores se enfocaron en la hojarasca de *Quercus coccifera* (especie arbustiva del bosque esclerófilo), y en la concentración de alcanos que están contenidos en la cera cuticular, muestreados en condiciones de sequía agravada (5,5 años de restricción de precipitaciones). Como se esperaba, los resultados mostraron que las concentraciones más altas de alcanos cuticulares (pentacosano, hexacosano, heptacosano, octacosano, nonacosano, triacontano y untriacontano) -alcanzadas en condiciones de sequía agravada- se asocian con una mayor inflamabilidad de la cama de hojarasca. Por lo cual, los autores sugieren que la inflamabilidad de *Q. coccifera* podría aumentar en un escenario más seco en el área del Mediterráneo [30].

Bajo un escenario de cambio climático caracterizado por sequías más severas en el clima mediterráneo, la vegetación nativa podría presentar variaciones en la carga de sus ceras cuticulares como respuesta adaptativa. En este sentido, es necesario investigar más a fondo la relación entre la inflamabilidad de las hojas frescas de especies nativas y los rasgos químicos, centrándose en la concentración de compuestos químicos inflamables

(ácidos grasos, alcanos, alcoholes primarios y secundarios, aldehídos y cetonas) presentes en la cera cuticular. Una mayor concentración de compuestos químicos asociados a las ceras cuticulares se relacionaría con una mayor inflamabilidad de la vegetación, dadas las características intrínsecas de estos compuestos.

CAPITULO 2 – OBJETIVO DE INVESTIGACIÓN

El aumento en la frecuencia y severidad de los incendios forestales en zonas de clima mediterráneo hace urgente comprender el comportamiento del combustible vegetal nativo. Las especies del bosque esclerófilo chileno han desarrollado adaptaciones clave para sobrevivir al estrés ambiental, destacando la alta producción de ceras cuticulares en sus hojas. Sin embargo, existe un importante vacío de conocimiento: el rol exacto de la composición química de estas ceras en la dinámica del fuego. Por lo tanto, el desafío científico radica en descifrar cómo las ceras cuticulares de las hojas interactúan con el fuego. Para abordar esto, el presente estudio plantea las siguientes interrogantes fundamentales: ¿Cómo influye el contenido total y la composición química de las ceras cuticulares en los parámetros de inflamabilidad de las hojas de especies nativas?, ¿existen grupos de compuestos químicos específicos que actúen diferencialmente como impulsores del fuego?, ¿Es posible agrupar y predecir el comportamiento frente al fuego de estas especies nativas basándose exclusivamente en sus perfiles químicos cuticulares?

2.1 Hipótesis

Una mayor concentración de ceras cuticulares impulsa positivamente la inflamabilidad foliar en las especies nativas del bosque esclerófilo chileno (*C. alba*, *Q. saponaria*, *C. odorifera*, *L. caustica*, *E. pulverulenta*, *P. lingue*), siendo la composición química de estas ceras (alcanos, aldehídos, cetonas y/o ésteres) el factor diferencial que modula los parámetros de inflamabilidad.

2.2 Objetivos Generales

Evaluar la composición química de las ceras cuticulares y los parámetros de inflamabilidad de las hojas de especies esclerófilas nativas de zonas de clima mediterráneo y relacionar la influencia de los compuestos constituyentes de las ceras como impulsores o retardante del fuego en incendios forestales.

2.3 Objetivos Específicos

- i. Extraer y caracterizar compuestos químicos constituyentes de las ceras cuticulares presentes en las hojas de especies nativas seleccionadas para el estudio.
- ii. Evaluar la inflamabilidad de las especies nativas seleccionadas, considerando los parámetros de tiempo de ignición, duración de la llama y tiempo de combustión.
- iii. Estudiar el efecto del contenido de cera cuticular sobre la inflamabilidad de hojas de especies nativas seleccionadas mediante un análisis estadístico descriptivo seguido de un análisis de componentes principales y un análisis de permutación estadística multivariada no paramétrica.

CAPÍTULO 3 - PARTE EXPERIMENTAL Y METODOLOGIAS

Área de estudio

La zona de estudio está inmersa en la Región Mediterránea de Chile Central, la cual es una de las cinco zonas de clima mediterráneo a nivel mundial, caracterizada por ser una ecorregión de alta prioridad para la conservación debido a su gran índice/número de endemismos. El clima predominante en el área es del tipo mediterráneo, es decir, una estacionalidad marcada de invierno lluvioso y verano seco y caluroso. La precipitación media anual es de 700 mm, mientras que la temperatura media anual en el área de estudio es de 11 °C [36]. El estudio se llevó a cabo en el Parque Nacional Río Clarillo (PNRC), ubicado en la Comuna de Pirque, Región Metropolitana de Chile (aproximadamente entre los 33°41' y 33°52' S de latitud, y los 70°28' y 70°37' O de longitud) durante la temporada de verano del año 2023 y 2024. El parque se extiende altitudinalmente desde aproximadamente los 850 hasta los 3.000 metros sobre el nivel del mar (msnm), con diferentes gradientes que influyen en la composición vegetal y constituye una de las áreas silvestres protegidas más importantes del ecosistema de la Cordillera de los Andes en Chile central. La Reserva abarca una superficie de 13.134,15 ha donde la vegetación predominante es un mosaico que incluye matorral esclerófilo y espinoso, junto con la estepa andina en cotas superiores [37]. Aunque también existen plantaciones forestales de especies nativas y exóticas [38], las especies leñosas más representativas de este bosque esclerófilo son: *L. caustica*, *C. alba*, *Q. saponaria* y *Kageneckia angustifolia*.

4.2 Recolección de muestra

Se recolectaron hojas de 10 individuos de cada una de las siguientes especies: *Q. saponaria*, *C. odorifera*, *L. caustica*, *E. pulverulenta*, *P. lingue* y *C. alba*. El muestreo se realizó en un gradiente altitudinal comprendido entre los 881 y 971 m.s.n.m. En total, la masa recolectada fue de 80 gramos por individuo. La recolección de material vegetal se realizó siguiendo el procedimiento descrito por Guerrero et al., [26, 39]. Para asegurar una muestra representativa y homogénea de la variabilidad intraespecífica, se recolectaron hojas de tres secciones del dosel según su exposición solar: alta, media y baja. Posteriormente, las hojas de las tres secciones de cada individuo se mezclaron para conformar una única muestra compuesta por ejemplar, garantizando así una

representación integral del dosel en los análisis posteriores. Cada muestra se almacenó en una bolsa de plástico sellada y debidamente etiquetada con el nombre de la especie, número de individuo y fecha de muestreo. Para mantener su frescura, las hojas se transportaron en una nevera portátil (50L, Evercool, Modelo ECF-50) a -4°C hasta el laboratorio y su posterior análisis. La masa vegetal recolectada se dividió en dos submuestras, un conjunto se destinó a la determinación de los parámetros de inflamabilidad, mientras que el otro se empleó para la caracterización química y cuantificación de las ceras cuticulares.

4.3 Mediciones de Inflamabilidad

Para evaluar la inflamabilidad de las muestras vegetales, se utilizó un epirradiator de 500 W (modelo 534 RC2, Quartz Alliance, Francia), un equipo estándar en este tipo de estudios que garantiza condiciones de temperatura controladas para las pruebas de combustión [40]. Se realizaron 20 pruebas de combustión sucesivas para cada individuo de $1,0 \pm 0,1$ gramos. Cada muestra fue colocada sobre la superficie del epirradiator que mantenía una temperatura de 440°C aproximadamente, con una llama piloto situada a 4 cm sobre la superficie del epirradiator, facilitando la ignición de los compuestos volátiles liberados por la degradación térmica de la muestra vegetal. Durante cada ensayo se midieron cuatro parámetros de inflamabilidad: tiempo de ignición (TI), duración de la llama (DLL), tiempo de combustión (TC), y porcentaje de ensayos positivos (PI). El TI es el tiempo que transcurre desde la colocación de la muestra sobre la superficie del epirradiator hasta la presencia de llama (s), la DLL es el tiempo que dura la llama (s), el TC descrito por el tiempo que transcurre desde que la hoja está expuesta al calor hasta la desaparición de las brasas, y el porcentaje de ensayos positivos (PI) es la cantidad de ensayos en los que hubo presencia de llama. Finalmente, las variables TI y PI combinadas se utilizaron para determinar el índice de inflamabilidad (IF), que clasifica a las especies en categorías de inflamabilidad entre 1 a 5 (baja inflamabilidad hasta extrema inflamabilidad) según el método de Valette [40].

4.4 Extracción Química

Se tomó una submuestra de 5 g de hojas frescas para el análisis de ceras cuticulares. La muestra fue sometida a un proceso de secado a temperatura ambiente, asegurando que el material no fuera expuesto a la radiación solar directa. Para la extracción de las ceras

cuticulares, se utilizó un digestor de microondas (MILESTONE, ETHOS X, número de serie: 23047263). Las hojas se mantuvieron intactas para preservar su morfología original. De cada muestra seca, se pesó 1 g de material foliar, el cual fue colocado en un tubo de vidrio de 100 mL con 30 mL de hexano (una muestra compuesta por individuo). El digestor de microondas operó con los siguientes parámetros: tiempo de calentamiento de 5 minutos (min) de 30°C a 50°C, con una longitud de onda de 950 MW. Luego, la configuración permaneció en 50°C durante 20 min y finalizó con un tiempo de enfriamiento de 15 min hasta llegar a temperatura ambiente. Por lo que el tiempo total de extracción fue de 40 min. Posteriormente, los 30 mL de extracto obtenidos fueron concentrados mediante el uso de un rotavapor hasta alcanzar un volumen final de 20 mL. Finalmente, los extractos fueron almacenados en viales de 20 mL en un refrigerador a 3°C hasta su posterior análisis en el cromatógrafo de gases acoplado a espectrómetro de masas (GC-MS).

4.5 Identificación y Cuantificación de Compuestos Químicos

Para los análisis químicos, se combinaron los diez individuos en tres muestras compuestas (mixes): dos de ellas con tres individuos cada una, y la tercera con los cuatro restantes. Los extractos se filtraron mediante un embudo Buchner con papel filtro cualitativo (150 mm de diámetro; Cat No 1001-150) debido a la formación de precipitados durante su almacenamiento. Luego, los extractos filtrados fueron analizados por GC/MS tipo GC/MS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Kyoto, Japón). La columna capilar empleada fue Rxi-5Sil MS de sílice fundida no polar (15 m × 0,25 mm DI, 0,25 µm de espesor; Restek, Bellafonte, PA, EE. UU.). El gas portador fue helio a una velocidad de flujo de 0,96 ml min⁻¹, a una presión de 54,9 kPa. El horno se programó a una temperatura inicial de 100 °C (durante 1 min), luego a 200 °C con ratio de 20 °C min⁻¹ y finalmente hasta llegar a 300 °C en 10 °C min⁻¹ durante 30 min, donde el tiempo total de operación fue de 35 min. La inyección se realizó bajo la modalidad de split 1:10 y la temperatura del inyector fue de 220 °C. El espectrómetro de masas funcionó en modo de barrido completo (rango de barrido m/z 35–500, frecuencia de barrido 0,3 s / barrido) a 70 eV. La identificación de compuestos químicos se realizó con el software GCMS Postrun análisis comparando su espectro de masa, según la librería NIST11, además, para verificar estos compuestos químicos obtenidos, se inyectó un patrón de alcanos (C₇-C₄₀) para obtener el índice de retención y compararlos con los reportados según la base de datos (NIST11).

Para la cuantificación de los compuestos químicos, se utilizó el estándar 1-octadecanol $\geq 99,9\%$ (Sigma aldrich). Inicialmente, 1,1 mg de 1-octadecanol se diluyeron en 1,1 mL de hexano donde se obtuvieron las siguientes concentraciones y curva de calibrado (Fig. 2).

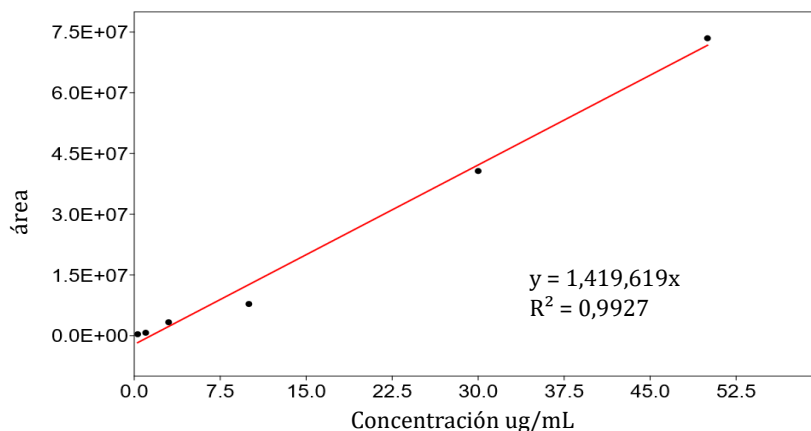


FIGURA 2: CURVA CALIBRADO 1-OCTADECANOL.

4.6 Análisis del Contenido de Humedad

Para la determinación del contenido de humedad, se procesaron muestras de hojas frescas (aprox. 5,0 g por individuo) recolectadas el día de la campaña de terreno. Posteriormente, las muestras se sometieron a un proceso de secado en estufa a 60 °C durante un periodo de 72 horas, hasta alcanzar peso constante. Las mediciones de masa fresca y seca se realizaron mediante una termobalanza de precisión PCE-MB 210C, calculando finalmente el porcentaje de humedad en base seca.

4.7 Análisis de datos

Para evaluar diferencias entre especies en sus parámetros de inflamabilidad (TI, DLL, TC y PI), y clases de compuestos químicos presentes en las ceras cuticulares (contenido de ceras totales, alcanos totales y no-alcanos totales) se realizaron modelos lineales y modelos lineales generalizados (LM y GLM) con la especie como factor fijo, en R (R Core Team, 2024 versión 4.5). Las posibles diferencias entre los niveles del factor fijo se probaron utilizando contrastes por pares ajustados para comparaciones múltiples (Tukey posthoc tests) con el paquete emmeans multcomp [41]. Para evaluar la normalidad y homocedasticidad de los datos, se realizaron pruebas de Shapiro-Wilk, y métodos visuales como gráficos QQ plot e histogramas. La mayoría de las variables

respuesta mostraron distribución normal excepto la variable concentración total de alcanos, para la que se usó una distribución lognormal gaussian (link = "log" con el paquete glmmTMB, [42]) y PI para la que se usó una distribución binomial para cumplir con los supuestos del modelo. Además, debido a la presencia de numerosos datos con PI 0 % y/o 100 % que impiden una estimación post-hoc válida, para esta variable se aplicó una corrección de continuidad ($\pm 0,5$ a los éxitos y fracasos), previa a las estimaciones de post-hoc. Se analizó la posible correlación entre el contenido de humedad, las variables de inflamabilidad y los compuestos químicos mediante matrices de correlación de Pearson, utilizando los paquetes dplyr [43] para manipulación de datos y Hmisc [44] en R (R Core Team, 2024).

Para describir la relación entre las cuatro variables asociadas a la inflamabilidad y las seis especies bajo estudio se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP). Este análisis incluyó las variables TI, DLL y TC y PI recopiladas de los 60 individuos muestreados, correspondientes a las seis especies. Para interpretar el ACP se consideraron los componentes principales (CP) que tuvieron valores propios (eigenvalues) >1 , según el criterio de Kaiser-Guttman. Se evaluó la esfericidad de Bartlett ($p < 0,05$) para asegurar la posibilidad de realizar una reducción de la dimensionalidad. Cada uno de los componentes principales se describió en base a los aportes de los valores de cada variable (loadings). El CP1 de inflamabilidad que explica la mayor parte de la variabilidad de los datos, y que muestra una fuerte carga de variables clave como el tiempo de ignición y la duración de la combustión permite posicionar a las especies a lo largo de un gradiente, facilitando su posterior clasificación en categorías de inflamabilidad. Para ello, además de la exploración visual del ordenamiento espacial se promediaron los valores (Scores) del CP1 para cada especie corroborando el agrupamiento. Los análisis se corrieron en Past 4.

Aplicando los mismos criterios de ACP utilizados para las variables de inflamabilidad, se replicó el análisis considerando las variables asociadas a la concentración de compuestos químicos, incluyendo: alcanos, aldehídos, cetonas, esterres, triterpenos, olefinas, tocoferoles y compuestos desconocidos. Para este análisis no se incluyó la especie *E. pulverulenta*, ya que esta especie presentó dificultad en la cuantificación de sus compuestos químicos debido a la superposición de sus picos cromatográficos.

Posteriormente a este ACP químico, se realizó un nuevo ACP con los parámetros de inflamabilidad, pero sin incluir la especie *E. pulverulenta*, para permitir una comparación justa entre los parámetros de inflamabilidad y los datos químicos (i.e., mismas especies). Finalmente, con el fin de explorar la correlación entre ambos conjuntos de variables (componentes de la inflamabilidad y compuestos químicos contenidos en las ceras cuticulares), se examinó la correlación estadística entre el primer componente principal (CP1) de inflamabilidad y el primer componente principal (CP1) considerando el perfil químico. Además, se exploró de esta misma forma la correlación entre la concentración de cada grupo de compuestos químicos o compuestos claves particulares, y las variables asociadas a los ensayos de inflamabilidad y el CP1 obtenido al considerar estos parámetros. En la sección resultados se muestran las correlaciones significativas o marginalmente significativas ($p \leq 0,05$).

CAPITULO 5 – RESULTADOS

5.1 Mediciones de Inflamabilidad

Todas las variables de inflamabilidad mostraron diferencias entre especies ($p < 0,05$). El PI varió significativamente entre especies, siendo *C. odorifera* la que presentó valores aproximadamente tres veces menores que los de las demás, las cuales mostraron probabilidades muy altas (98–100%; $\chi^2 = 389,3$, $gl = 5,54$, $p < 0,0001$; Fig. 3). Considerando las muestras que encendieron, se observó que el TI varió entre especies, siendo *P. lingue* la especie con menor TI y *C. odorifera* la de mayor TI ($F = 13,92$, $gl = 5, 54$, $p < 0,0001$; Fig. 4). La DLL también varió entre especies, con tiempos promedio que variaron entre 4,6 y 10,6 s, siendo *C. odorifera* la especie con DLL significativamente menor en comparación al resto de las especies ($F = 12,23$, $gl = 5, 54$, $p < 0,0001$; Fig. 5). El TC total también varió entre especies, donde *C. odorifera* obtuvo el TC promedio más prolongado, 101,7 s, mientras que *P. lingue* presentó el más corto con 55,8 s ($F = 19,1$, $gl = 5, 54$, $p < 0,0001$; Fig. 6).

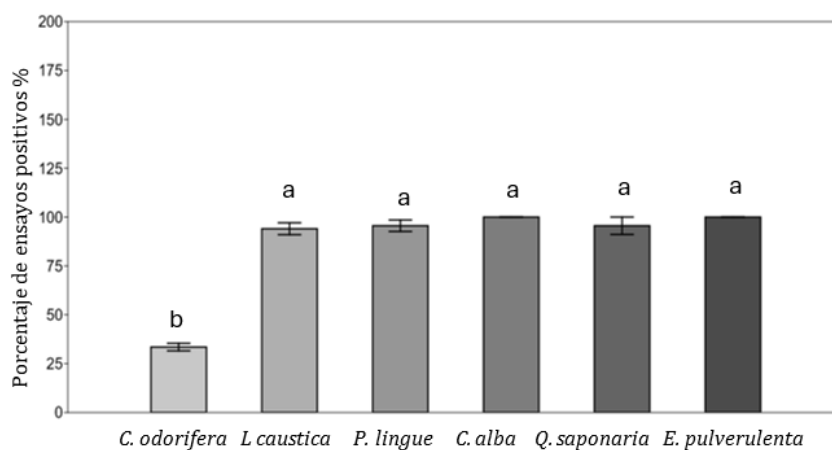


FIGURA 3: PORCENTAJE DE IGNICIÓN DE LAS ESPECIES.

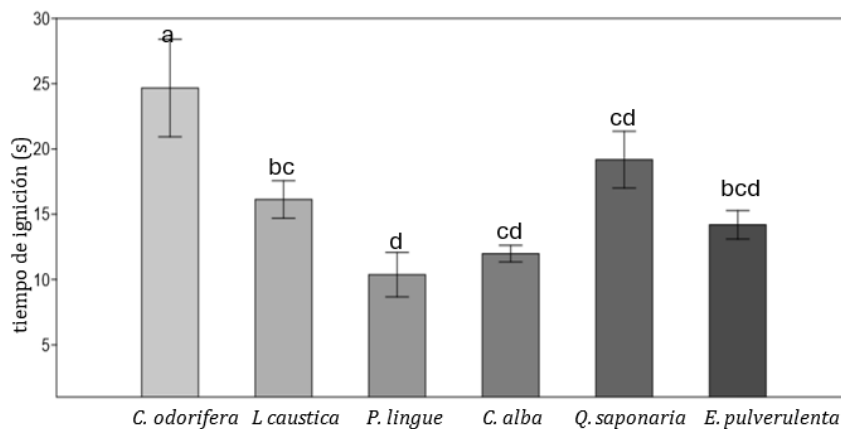


FIGURA 4: TIEMPO DE IGNICIÓN DE LAS ESPECIES.

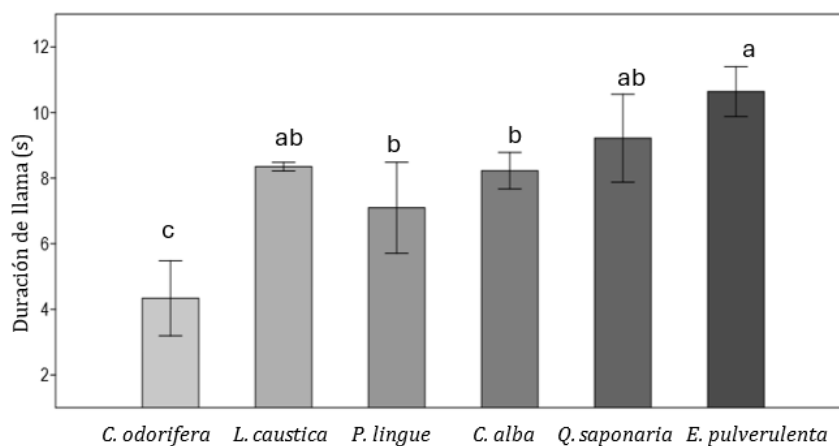


FIGURA 5: DURACIÓN DE LLAMA DE LAS ESPECIES.

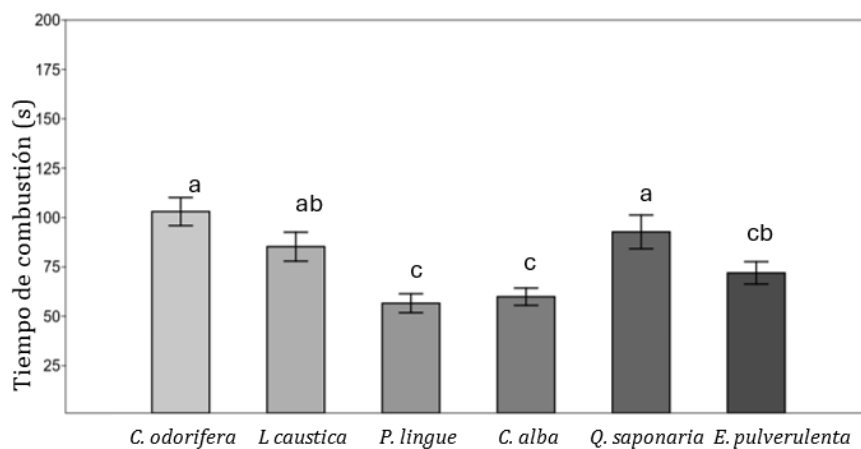


FIGURA 6: TIEMPO DE COMBUSTIÓN DE LAS ESPECIES.

La matriz de correlaciones de Pearson evidenció varias relaciones importantes (tabla 1). La correlación más fuerte y significativa fue positiva entre el TI y el TC, con un coeficiente de 0,86. También hubo una correlación positiva y significativa entre PI y DLL, con un coeficiente de 0,66. Por otro lado, se observaron correlaciones negativas significativas, entre el TI y los parámetros PI y DLL, con coeficientes de -0,65 y -0,45, respectivamente. Además, se registró una correlación negativa entre el TC y PI con un coeficiente de -0,53. El contenido de humedad (CH) no presentó una correlación significativa con ningún parámetro de inflamabilidad.

TABLA 1: CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE LOS PARÁMETROS DE INFLAMABILIDAD.

	PI	TI	DLL	TC
CH	-0,055	0,073	-0,083	0,056
PI		-0,645	0,657	-0,540
TI			-0,448	0,864
DLL				-0,233

*Los valores en negrita representan una correlación significativa ($p < 0,05$)

Inicialmente las especies estudiadas se clasificaron según su inflamabilidad de acuerdo con la tabla de Valette (1990) utilizando los parámetros porcentaje de ignición y tiempo de ignición. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos según el Índice de Inflamabilidad (IF):

TABLA 2: CLASIFICACIÓN DE LA INFLAMABILIDAD SEGÚN LA ATABLA DE VALETTE (1990).

Especie	Clasificación (IF)
<i>P. lingue</i>	5
<i>C. alba</i>	5
<i>E. pulverulenta</i>	4
<i>L. caustica</i>	4
<i>Q. saponaria</i>	3
<i>C. odorifera</i>	0

Paralelamente, los resultados del ACP con los parámetros de inflamabilidad mostró que los componentes principales CP1 y CP2 explicaron el 90,3% de la varianza total de los datos (test de esfericidad de Bartlett $p < 0,001$; Fig. 3). El CP1 por sí solo explica el 67,7% de la varianza y se relacionó positivamente con los parámetros TI (factor loading= 0,55) y TC (0,49), y negativamente con DLL (-0,41) y PI (-0,52). Esto quiere decir, que a valores positivos de CP1 las especies son menos inflamables, reflejado principalmente en un menor PI, mayor TI y una menor DLL. Mientras que valores negativos de CP1, se asociaron a especies más inflamables de acuerdo a valores mayores de PI, menor TI, y mayor DLL. El CP2 explicó el 22,4% de la varianza y mostró una relación positiva con todos los rasgos de inflamabilidad. Sin embargo, sus contribuciones más fuertes se observaron para DLL (0,71) y TC (0,55), esto quiere decir que a valores positivos de CP2 se ubicaron las muestras representadas por un mayor DLL y mayor TC.

En base a este ordenamiento espacial de los datos, el ACP permitió identificar tres grupos principales de especies según su inflamabilidad relativa, es decir en comparación al grupo de especies bajo estudio. *P. lingue*, *C. alba* y *E. pulverulenta* se agrupan como las especies más inflamables. Estas se caracterizan por una mayor PI, menor TI y mayor DLL y que a su vez también reportan valores bajos de TC. El segundo grupo con valores de inflamabilidad intermedios está compuesto por *L. caustica* y *Q. saponaria*. En el caso de *Q. saponaria*, esta especie que presentó valores intermedios para CP1, también presentó valores positivos sobre el CP2 para todas las muestras analizadas, lo cual fue determinado básicamente por mayores valores de DLL. *C. odorifera* formó el último grupo, identificada como la especie menos inflamable de las seis, que se explica por su TI más largo, menor PI y también una menor DLL. Este agrupamiento se corroboró al evaluar los promedios

por especie de los valores del CP1 para cada individuo (fig. 7).

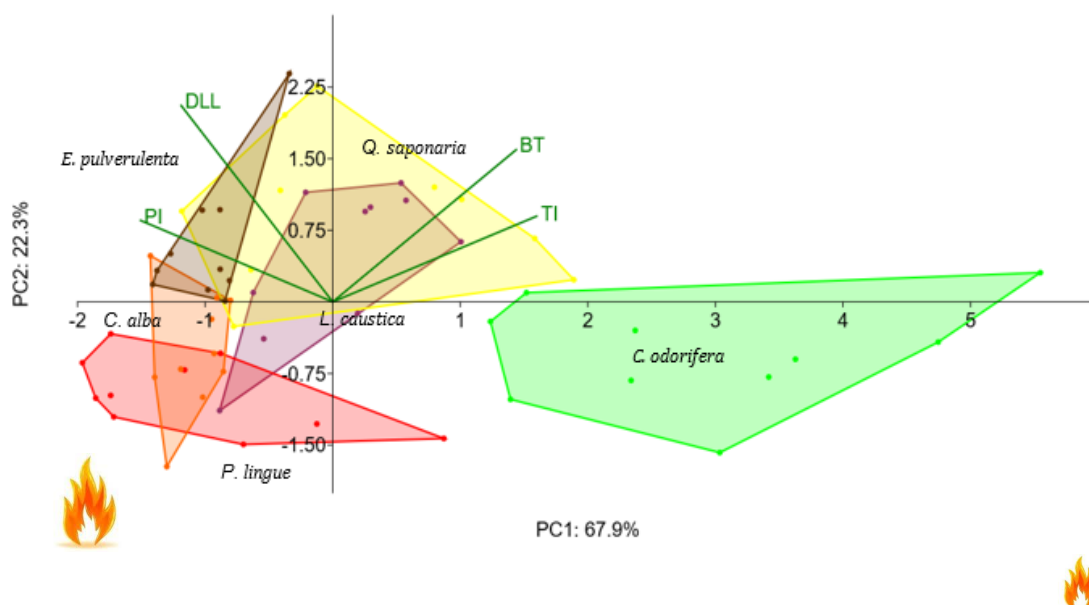


FIGURA 7: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) DE LOS PARÁMETROS DE INFLAMABILIDAD PARA LAS SEIS ESPECIES EN ESTUDIO, INCLUYENDO *ESCALLONIA PULVERULENTA*.

Al evaluar un segundo ACP sin incluir la especie *E. pulverulenta* para la comparación justa entre los parámetros de inflamabilidad y la caracterización química, se obtuvieron patrones similares a los observados en el primer ACP. Los resultados revelaron que CP1 y CP2 explicaron el 93,6% de la variabilidad total de los datos (test de esfericidad de Bartlett $p < 0,001$). CP1 explicó el 75,4 % de la varianza, mientras que el CP2 explicó el 18,2 % de la varianza. CP1 se asocia principalmente con TI y TC, que tienen valores positivos de 0,54 y 0,49, respectivamente. Este componente también tiene una correlación negativa con PI de -0,52 y DLL con -0,41. El CP2 está fuertemente influenciado por la DLL y el TC, con cargas positivas de 0,71 y 0,55 (fig. 8).

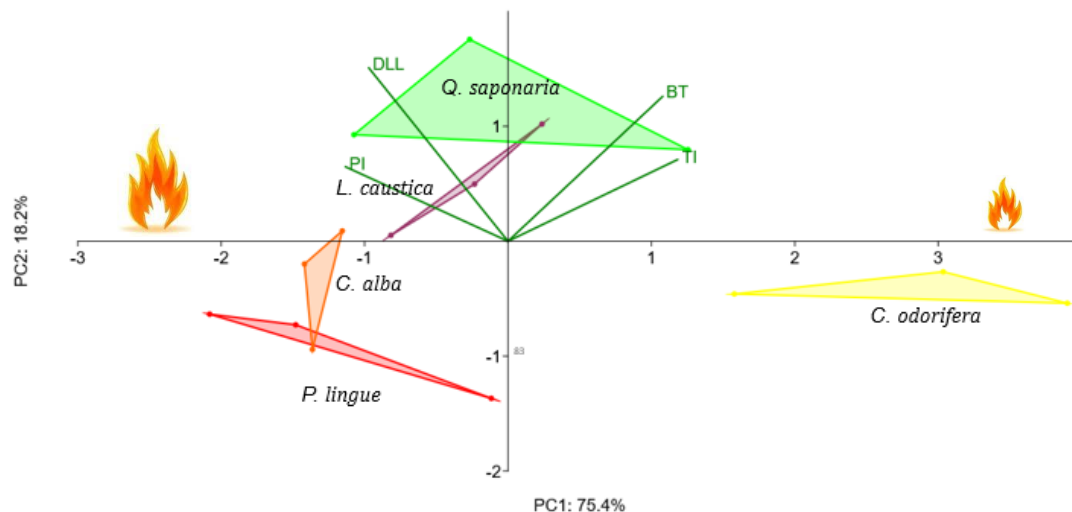


FIGURA 8: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) DE LOS PARÁMETROS DE INFLAMABILIDAD PARA CINCO ESPECIES EN ESTUDIO, SIN ESCALLONIA PULVERULENTA.

En base a la ubicación espacial relativa entre las cinco especies en el nuevo ACP, se observa que el ordenamiento de las mismas, según la caracterización de su inflamabilidad, fue similar al primer ACP. El primer grupo, más inflamable, contiene a *P. lingue* y *C. alba*. El segundo grupo, de inflamabilidad media, contiene a *Q. saponaria* y *L. caustica*, quienes presentaron puntuaciones positivas en relación al CP2. Finalmente, el tercer grupo conformado únicamente por *C. odorifera*, indica que es la especie menos inflamable de las cinco especies.

Los resultados obtenidos de la clasificación de Valette exhiben agrupaciones similares a las obtenidas en el Análisis de Componentes Principales (ACP). En ambos análisis se observa que *P. lingue* y *C. alba* se asocian estrechamente debido a la similitud en sus parámetros de inflamabilidad (Índice de val. Por otro lado, *Lithraea caustica* y *Quillaja saponaria* se posicionan en un rango de inflamabilidad intermedia. Finalmente, *Colliguaja odorifera* (o *C. integerrima*, según corresponda) se distancia del resto de los taxones estudiados, siendo catalogada de manera consistente como la especie de menor inflamabilidad.

Se puede ver una similitud entre los resultados obtenidos según la clasificación de Valette y los resultados obtenidos del ACP, donde agrupa a las especies más inflamables *P. lingue* y *C. alba* por ser especies parecidas según sus parámetros de inflamabilidad (IF=5), mientras que a *L. caustica* y *Q. saponaria* están dentro de una inflamabilidad intermedia.

(IF=4, 3 respectivamente). En contraste, *C. odorifera* se separa de las demás especies y se presenta como una especie única y diferenciada, caracterizándose por presentar una menor inflamabilidad entre las muestras evaluadas al registrar un IF=0.

5.2 Contenido de Ceras Cuticulares

Los análisis químicos de las ceras cuticulares revelaron la presencia de diversas familias de compuestos orgánicos. En particular, se identificaron cetonas, aldehídos, alcoholes, ésteres, triterpenos, tocoferoles, flavonoides y olefinas como los grupos principales dentro de la fracción de no alcanos. Asimismo, las especies variaron en su contenido total de ceras ($F= 10,61$, $gl= 4, 10$, $P= 0,001$, Fig. 9), así como el contenido total de alcanos ($F= 10,06$, $gl= 4, 10$, $p= 0,001$, Fig. 10) y no alcanos ($F= 19,36$, $gl= 4, 10$, $P= 0,0001$, Fig 11).

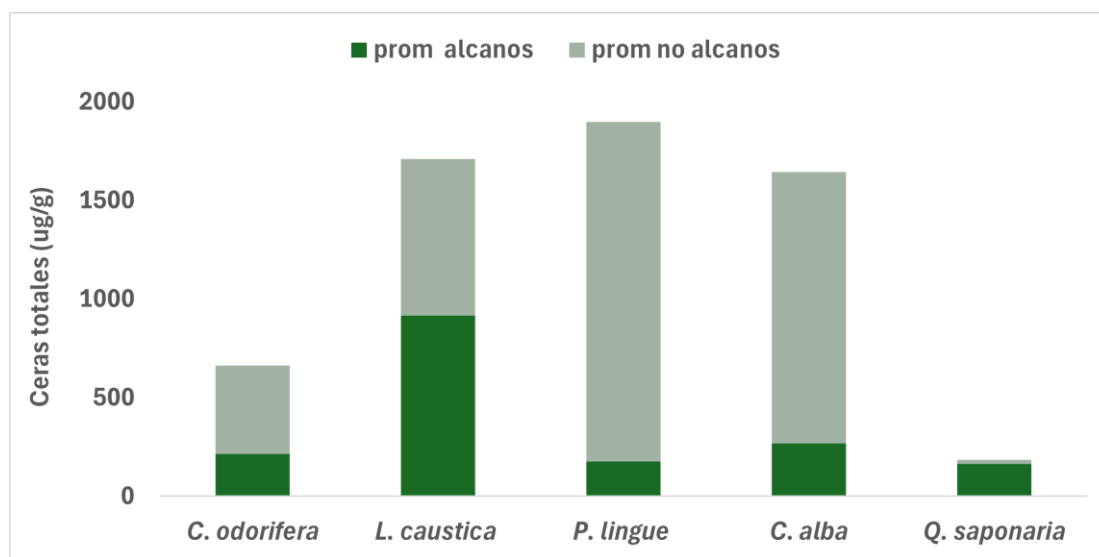


FIGURA 9: CERAS TOTALES

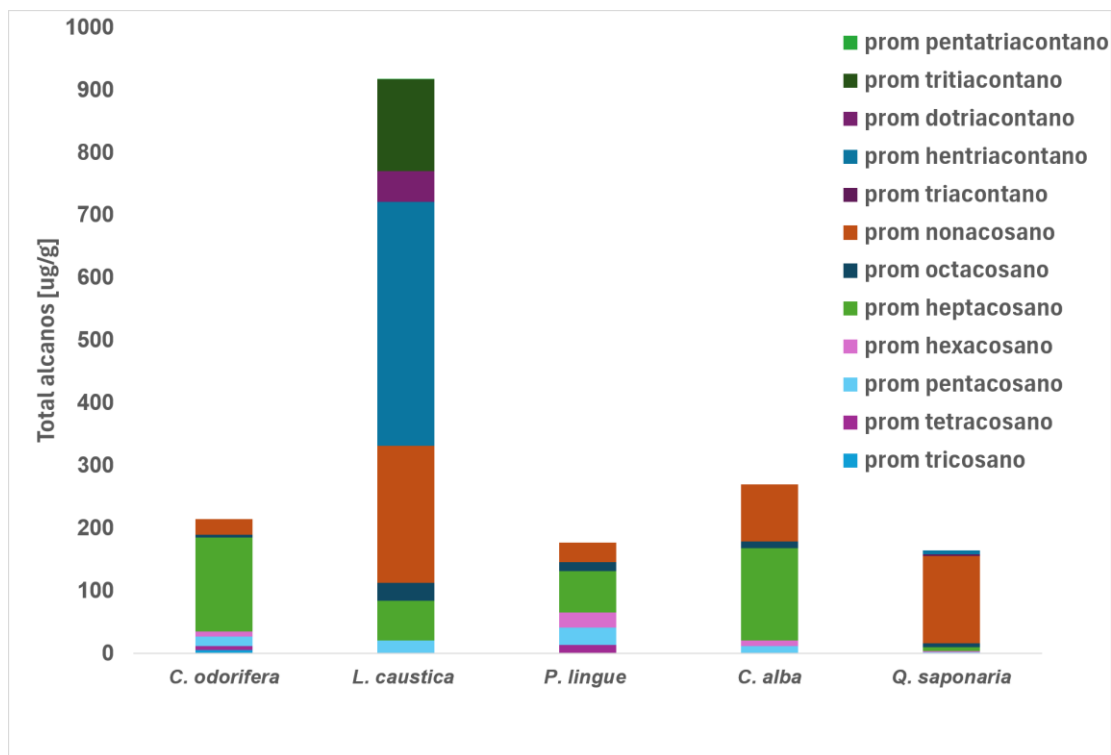


FIGURA 10: TOTAL ALCANOS

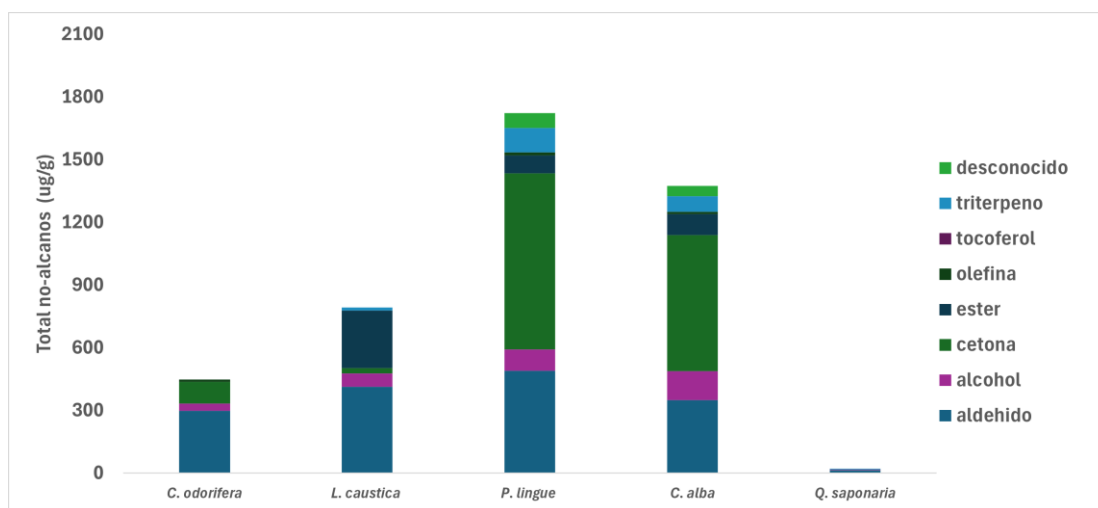


FIGURA 11: TOTAL NO-ALCANOS

La composición química de las ceras fue dominada por los no-alcános (71%) en comparación con los alcános totales (29%). Entre los no-alcános los más abundantes fueron: cetonas (27%), aldehídos (26%) y ésteres (8%). La especie con el menor contenido promedio de ceras fue *Q. saponaria* con un valor de 185,03 µg/g. Por el contrario, *P. lingue* presentó el mayor contenido promedio, con un valor de 1899,23 µg/g. Los resultados de *Q. saponaria* y *C. odorifera* sugieren que su composición química es

menos diversa en comparación con las demás especies, con 12 compuestos químicos identificados para ambas especies. Específicamente, *Q. saponaria* se caracterizó por la marcada predominancia de un único compuesto, nonacosano (alcano), que constituye el 75% de su composición. Para *C. odorifera*, la composición fue más variada: octacosanal (aldehído, 42%), heptacosano (alcano, 23%), y 10-, 12- + 14-heptacosanona (cetona, 16%). *L. caustica* exhibió el perfil químico más diverso, con la identificación de un total de 26 compuestos químicos. La composición química de *L. caustica* está dominada por los alcanos hentriacontano (23%) y nonacosano (13%), y dentro del grupo de los no-alcanos los aldehídos constituyeron el 24% (en particular el octacosanal en un 10%) y los ésteres el 16%. El análisis químico de los contenidos de cera de *P. lingue* y *C. alba* revelaron perfiles de composición similares. Ambas especies comparten la predominancia de compuestos y grupos químicos, como el total de alcanos, total no alcanos, cetonas y aldehídos. En ambos perfiles, el grupo de no alcanos fue el predominante, constituyendo un 84% de la composición en *C. alba* y un 91% en *P. lingue*. El grupo de cetonas mostró la mayor proporción dentro de los no-alcanos, con un 44% en *P. lingue* y un 40% en *C. alba*, con la total predominancia del compuesto químico 16-hentriacontanona en ambas especies. De manera similar, el grupo de aldehídos también fue significativo, representando un 26% en *P. lingue* y un 20% en *C. alba*, siendo el octacosanal el compuesto más dominante dentro de este grupo, con un 18% y 17% de abundancia relativa, respectivamente.

Los alcanos pentacosano, heptacosano, octacosano y nonacosano se detectaron en todas las especies analizadas. Sin embargo, el hexacosano se diferenció de este patrón general al encontrarse ausente en *L. caustica*. Por otra parte, el tetracosano se detectó para las especies *C. odorifera* y *P. Lingue*, mientras que el hentriacontano se registró en *Q. saponaria* y *L. caustica*. Además se observaron compuestos exclusivos: el tricosano (1%) y el triacontano (2%) se detectaron únicamente en *C. odorifera* y *Q. saponaria* respectivamente; por su parte, la presencia de dotriacontano (3%), tritriacontano (9%) y pentatriacontano (0,02%) estuvo estrictamente limitada a los extractos de *L. caustica*. Debido a esta distribución restringida, dichos compuestos exclusivos no fueron incluidos en los análisis de varianza (ANOVA) ni de correlación, destacándose en su lugar como posibles marcadores químicos específicos para estas especies.

La matriz de correlación de Spearman evidenció numerosas correlaciones significativas que indican una alta interdependencia entre varios compuestos (tabla 2). Se evidenció una correlación positiva entre las clases de compuestos alcanos y ésteres ($r = 0,66$; $p < 0,05$), y el grupo aldehído se correlacionó significativamente con ésteres ($r = 0,74$; $p < 0,05$), cetonas ($r = 0,66$; $p < 0,05$) y alcohol ($r = 0,52$; $p < 0,05$). Se observó una alta correlación intragrupo dentro de la familia de los alcanos: entre el hexacosano y nonacosano ($r = -0,76$; $p < 0,05$), así como también entre el pentacosano y octacosano ($r = 0,73$; $p < 0,05$). En segundo lugar, el análisis reveló interacciones significativas entre los alcanos y otras clases de compuestos funcionales. La clase de los ésteres mostró una afinidad particularmente alta con los alcanos octacosano ($r = 0,86$; $p < 0,05$) y pentacosano ($r = 0,62$; $p < 0,05$). Así como también la familia de los aldehídos presentó una alta correlación con el alcano octacosano ($r = 0,81$; $p < 0,05$). Por último, se registraron asociaciones negativas entre el compuesto nonacosano con las olefinas ($r = -0,77$; $p < 0,05$), y con las cetonas ($r = -0,57$; $p < 0,05$).

TABLA 3: CORRELACIÓN DE SPEARMAN ENTRE COMPUESTOS Y CLASES DE COMPUESTOS QUÍMICOS.

	16-hentriacontanona	aldehído	alcohol	cetona	éster
aldehído	0,71				
alcohol	0,49	0,52			
cetona		0,66	0,44		
éster	0,69	0,74	0,68	0,37	
olefina	0,34	0,25	0,41	0,72	-0,06
triterpeno	0,78	0,50	0,64	0,51	0,67

	alcanos	no-alcanos	pentacosano	hexacosano	heptacosano	octacosano	nonacosano
alcanos	0,26						
pentacosano		0,62					
hexacosano		0,58	0,34				
heptacosano		0,41	0,45	0,32			
octacosano		0,69	0,73	0,12	0,09		
nonacosano		-0,17	-0,21	-0,76	-0,33	0,33	
triacontano		-0,68	-0,69	-0,34	-0,68	-0,39	0,37
16-hentriacontanona	0,18		0,57	0,57	0,20	0,71	-0,12
aldehído	0,45		0,89	0,29	0,42	0,81	-0,03
alcohol	0,39		0,46	0,22	0,39	0,54	0,04
cetona	0,00		0,57	0,83	0,56	0,38	-0,57
éster	0,66		0,62	-0,04	0,25	0,86	0,42
olefina	-0,16		0,38	0,82	0,60	-0,02	-0,77
triterpeno	0,07		0,29	0,35	-0,04	0,64	0,18

*Los valores en negrita representan una correlación significativa ($p < 0,05$)

El análisis de componentes principales (ACP) en base a la caracterización química de las especies, indica que los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) en conjunto explican el 69,71% de la varianza total de los datos (test de esfericidad de Bartlett $p < 0,001$; Fig. 6). El CP1 explica el 43,40% de la varianza y está asociado positivamente a los grupos de compuestos de aldehídos (0,37), alcoholes (0,44), cetonas (0,38) y los triterpenos (0,45). El CP2, se relacionó positivamente con el grupo de los alcanos (-0,62) y los ésteres (0,57).

A partir del ordenamiento espacial de este último ACP, se observan tres grupos claros. El primer grupo, conformado por *P. lingue* y *C. alba* en el cuadrante inferior derecho indican una gran similitud en su composición química de ceras, caracterizada por altas concentraciones de cetonas, aldehídos, alcoholes, olefinas y triterpenos y en general un mayor contenido de ceras totales. El segundo grupo, conformado por *Q. saponaria* y *C. odorifera* y ubicado en el lado izquierdo inferior del gráfico, indica especies con un perfil de ceras cuticulares menos diverso y con una mayor concentración de tocoferoles. El tercer grupo, está representado únicamente por *L. caustica*, la cual se proyecta en una región diferente (cuadrante superior izquierdo). Su perfil químico se distingue por una mayor abundancia de alcanos totales y ésteres, lo que sugiere una estrategia química distinta en comparación con las demás especies.

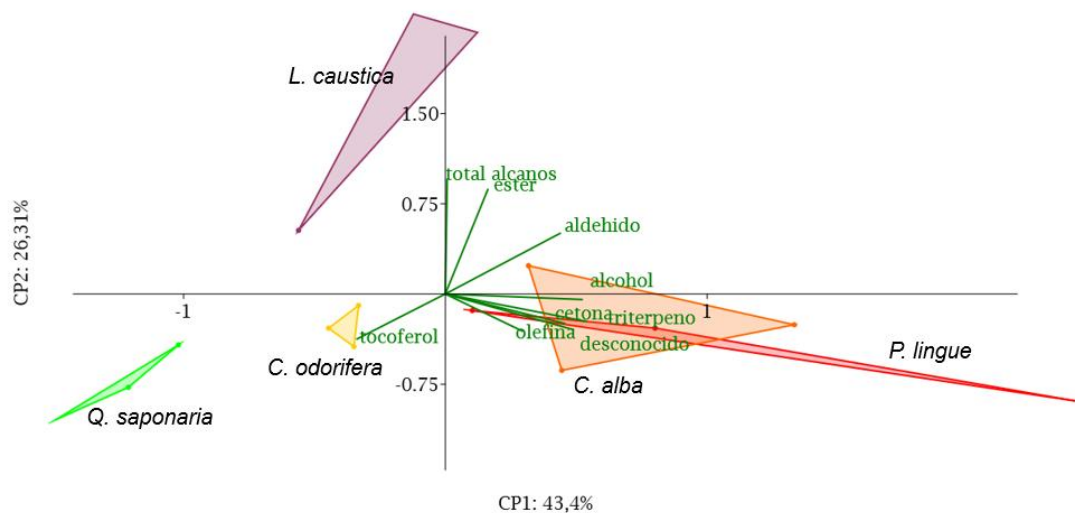


FIGURA 12: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) DE LAS CERAS CUTICULARES.

5.3 Relación entre inflamabilidad y ceras cuticulares

Entre las correlaciones más destacadas y significativas, el grupo de ceras totales mostró asociaciones negativas y significativas entre el TI ($r = -0,62$, $p < 0,05$, Fig. 13.B) y TC ($r = -0,61$, $p < 0,05$, Fig. 13.C). Además, se observó una significancia marginal negativa al correlacionar las ceras totales con el CP1 de inflamabilidad ($r = -0,50$, $p = 0,052$, Fig. 13.A). Estos resultados sugieren que una mayor cantidad de ceras totales contenidas en las hojas se asocia con una mayor inflamabilidad de la vegetación, relacionado principalmente al TI y TC. Dentro del grupo de ceras totales, los no alcanos fueron la clase de compuestos que mostró una influencia fuerte, negativa y significativa sobre las mismas variables: CP1 de inflamabilidad ($r = -0,57$, $p < 0,05$, Fig. 13.D), TI ($r = -0,71$, $p < 0,05$, Fig. 13.E) y TC ($r = -0,78$, $p < 0,05$, Fig. 13.F). Dentro de esta clase, los no alcanos, las cetonas mostraron una relevancia particular, evidenciando, de la misma forma, correlaciones negativas fuertes con el TI ($r = -0,71$, $p < 0,05$), el TC ($r = -0,83$, $p < 0,05$) y con el CP1 de inflamabilidad ($r = -0,59$, $p < 0,05$). Por último, si bien no fue un compuesto presente en todas las especies ni muestras, dentro del grupo de las cetonas el compuesto 16-hentriacontanona se correlacionó negativamente con el CP1 de inflamabilidad ($r = -0,64$, $p < 0,05$, Fig. 13.G), el TI ($r = -0,73$, $p < 0,05$, Fig. 13.H) y el TC ($r = -0,85$, $p < 0,05$, Fig. 13.I). En síntesis y en general, se observó que una mayor cantidad de ceras totales, y en particular de no alcanos, como las cetonas, se relacionó con una mayor inflamabilidad, ya sea representado por una alta ignitabilidad (i.e. valores bajos de TI), o valores bajos de CP1 asociados a una alta inflamabilidad. Por otra parte, el CP1 considerando el perfil químico se correlacionó negativamente con el TI ($r = -0,58$, $p < 0,05$) y TC ($r = -0,64$, $p < 0,05$). En síntesis y en general, se observó que una mayor cantidad de ceras totales, y en particular de no alcanos, como las cetonas, se relacionó con una mayor inflamabilidad, ya sea representado por una alta ignitabilidad (i.e. valores bajos de TI), o valores bajos de CP1 asociados a una alta inflamabilidad.

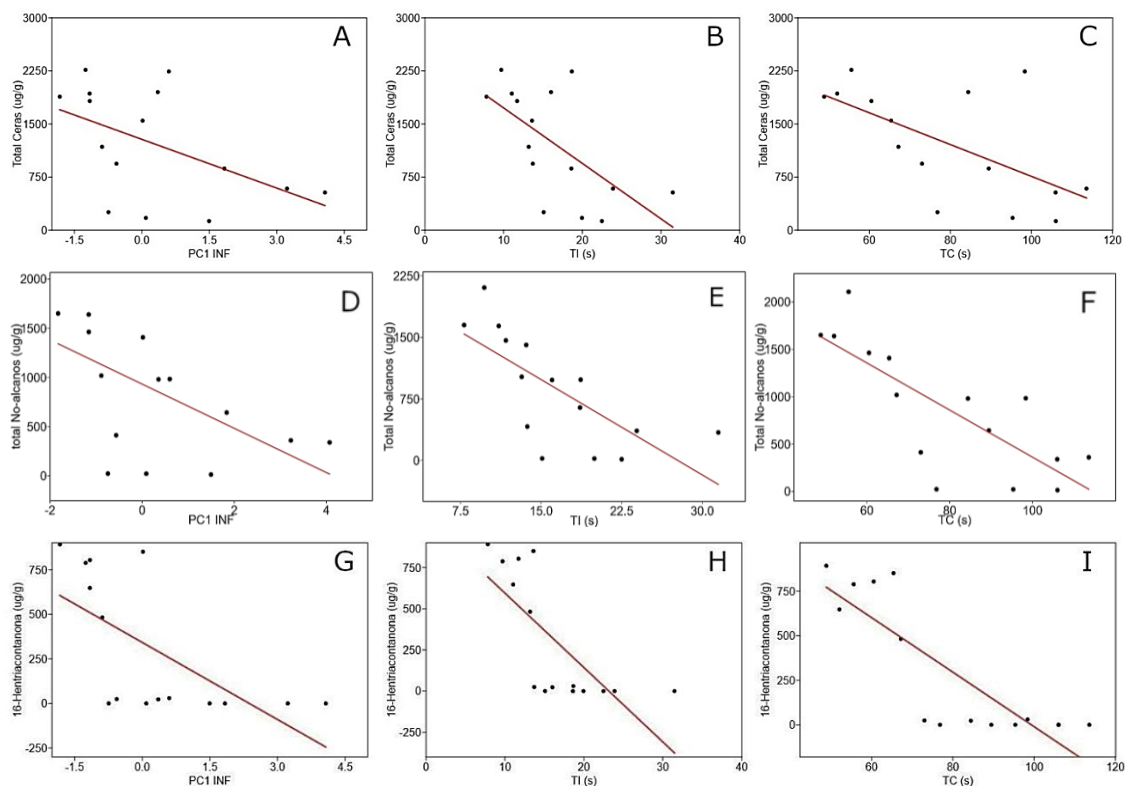


FIGURA 13: CORRELACIONES LINEALES PRINCIPALES ENTRE PARÁMETROS DE INFLAMABILIDAD Y CERAS CUTICULARES.

Para evaluar la relación global entre ambos conjuntos de variables (inflamabilidad y ceras cuticulares), se realizó un análisis de correlación de Pearson entre el primer componente principal de inflamabilidad (CP1 inf) y el primer componente principal químico (CP1 quim). Se observó un coeficiente de correlación débil ($r = -0,27$), siendo esta asociación no estadísticamente significativa ($p = 0,31$). Por el contrario, al aplicar la correlación no paramétrica de Spearman, se detectó una asociación negativa más fuerte y estadísticamente significativa ($r = -0,64$; $p = 0,01$).

Entre los alcanos, el nonacosano fue el compuesto químico identificado en todas las especies evaluadas, lo que refleja un patrón dentro del perfil químico observado. Además, este compuesto mostró una correlación positiva y significativa con el parámetro de inflamabilidad DLL ($r = 0,55$, $p < 0,05$, Fig. 14), mostrando que a una mayor concentración de nonacosano, la DLL tiende a aumentar. Por otro lado, se encontró una correlación negativa significativa entre el compuesto hexacosano y TC ($-0,58$, $p < 0,05$).

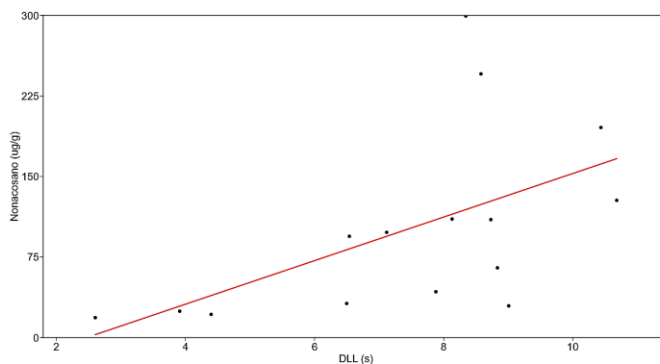


FIGURA 14: CORRELACIÓN ENTRE NONACOSANO Y DURACIÓN DE LLAMA (DLL).

Adicionalmente, se evaluó el comportamiento entre las variables químicas: Total ceras, Total no-alcanos, y 16-hentriacontanona en función de los parámetros de inflamabilidad TI y TC. Se identificó tendencias no lineales de tipo sigmoidal y exponencial. Las curvas de ajuste correspondientes y sus respectivos parámetros estadísticos se presentan detalladamente en el Anexo X.

CAPITULO 6 – DISCUSIÓN

En las cinco especies analizadas del Bosque Esclerófilo chileno, la caracterización química confirmó una amplia gama de compuestos, incluyendo alcanos, aldehídos, alcoholes, cetonas, ésteres, olefinas, tocoferoles y triterpenos, observando una variabilidad que confiere un perfil químico específico y único a cada especie evaluada [45, 46]. Como era de esperarse, los alcanos fueron detectados en todas las especies estudiadas, lo cual concuerda con su rol como componente esencial y omnipresente de las ceras cuticulares en plantas vasculares, particularmente en árboles y arbustos esclerófilos perennes donde el rango (C₂₀-C₃₄) es común [30, 47, 48]. Sin embargo, nuestro hallazgo principal sobre la inflamabilidad no fue dado por los alcanos como lo fue en el trabajo de Ormeño [30], que se centró exclusivamente en dicho grupo de compuestos para evaluar hojarasca. Por el contrario, el grupo de los no-alcanos exhibió una contribución mayor a los parámetros de inflamabilidad, modulando directamente el tiempo de ignición y el tiempo de combustión. Esta relación queda en evidencia al observar los perfiles de las especies más inflamables, donde los no-alcanos alcanzan proporciones de hasta un 91% en *P. lingue* y un 84% en *C. alba*.

Los resultados de los tests de inflamabilidad permitieron clasificar a las seis especies estudiadas, en base a los cuatro parámetros medidos, en tres grupos principales de inflamabilidad: alta, intermedia y baja (Fig. 15). A partir de estos análisis cruzados de inflamabilidad y química, se determinó que las especies con la mayor cantidad de compuestos del grupo no-alcanos presentes en las ceras cuticulares se asociaron con una alta inflamabilidad, indicando que una clase particular de estos compuestos podría ser el factor determinante en ciertos rasgos de la inflamabilidad.

Existe una vasta literatura que aborda la influencia de los terpenos en la inflamabilidad vegetal. Generalmente, una alta concentración de estos compuestos se ha asociado con un incremento en la inflamabilidad debido a su bajo punto de ignición. No obstante, las conclusiones de estos estudios indican que este grupo de compuestos no sería el único asociado a su inflamabilidad, ya que es sabido que existen múltiples factores naturales que pueden intervenir y modular la respuesta al fuego, tanto físicas como químicas, como se ha confirmado en diferentes estudios [48]. Desde la disciplina química, ha surgido una necesidad de expandir la caracterización química foliar más allá de los terpenos, donde estudios recientes buscan identificar otras clases de compuestos que puedan dar

respuesta al complejo entramado químico subyacente a los rasgos inflamables de las plantas [18, 26, 48, 49]. En este contexto, el presente estudio profundizó en el análisis de las ceras cuticulares, dado que estas constituyen la primera barrera que interactúa directamente con la fuente de ignición.

Entre las especies del grupo más inflamable según nuestros análisis de ACP se identificaron *P. lingue* y *C. alba*, modulados por un menor tiempo de ignición, menor tiempo de combustión y valores de 100% en el porcentaje de ignición. Estas especies comparten una mayor concentración de compuestos del grupo no-alcanos así como una alta concentración total de ceras cuticulares. Previamente se ha demostrado que concentraciones más altas de compuestos químicos cuticulares está asociado con un aumento en la inflamabilidad; sin embargo, esta conclusión se ha enfocado principalmente en el estudio de los alcanos [30]. Un hallazgo notable es que *P. lingue* y *C. alba* presentan una combinación de clases químicas en proporciones similares entre ambas especies, incluyendo alcanos, aldehídos, alcoholes, cetonas, ésteres y compuestos no identificados, esta composición química diversa podría ser un rasgo filogenético, dado que ambas especies pertenecen a la familia Lauráceas [50], y que podría ser un factor clave que determina su comportamiento altamente inflamable. En particular, ambas especies registraron la concentración más alta de cetonas, siendo el compuesto 16-hentriacontanona el de mayor concentración en *P. lingue* (más inflamable que *C. alba*), lo que coincide con el menor tiempo de ignición de esta especie en comparación con *C. alba*. En un análisis previo de inflamabilidad y composición química foliar realizado por Guerrero et. al. (2021) [39] en cinco especies (nativas y exóticas), solo *C. alba* presentó un alto contenido de la cetona 16-hentriacontanona, donde la alta inflamabilidad de esta especie fue comparable a la de la especie exótica altamente inflamable *Eucalyptus globulus*. Curiosamente, en un estudio posterior de Guerrero [26], las cetonas se detectaron casi exclusivamente en *Acacia dealbata* (especie exótica) y *C. alba*, donde ambas especies también se clasificaron entre las más inflamables. No obstante, a través de los diferentes estudios citados [26, 39], el compuesto 16-hentriacontanona se ha mantenido como un marcador químico característico y particular dentro de las ceras cuticulares de *C. alba*. Estos resultados sugieren que el compuesto 16-hentriacontanona podría ser un fuerte impulsor de la inflamabilidad. Este efecto se podría atribuir al bajo punto de inflamación de 16-hentriacontanona de 35,6°, así como a la interacción sinérgica con la combinación de otros grupos de compuestos cuticulares, cuya proporción

resultó similar entre *C. alba* y *P. lingue*. En este sentido, las ceras cuticulares constituyen el componente más externo de las hojas y la primera superficie en contacto con la llama o la atmósfera térmica. Por lo tanto, esta ubicación sugiere que las ceras cuticulares ricas en la cetona 16-hentriacontanona podrían jugar un rol determinante en la ignición aumentando significativamente la inflamabilidad de la especie al interactuar con una fuente de ignición.

La especie *L. caustica*, clasificada con inflamabilidad intermedia, se caracteriza por una mayor diversidad de compuestos químicos y un contenido alto de alcanos (principalmente hentriacontano y nonacosano), junto con concentraciones elevadas de ésteres y aldehídos. Este hallazgo resulta controversial, ya que estudios previos de Guerrero [26] posicionaron a *L. caustica* entre las especies menos inflamables (junto con *Q. saponaria*), con una menor predisposición a la ignición y bajo porcentaje de encendido. No obstante, Guerrero et. al 2024 [26] también reportó que *L. caustica* exhibía un alto contenido y diversidad de terpenos comparable al de especies exóticas altamente inflamables (*E. globulus* y *Pinus radiata*), sugiriendo que la alta concentración y diversidad de terpenos no eran suficientes para explicar la variabilidad en la inflamabilidad entre especies. En el presente estudio, si bien *L. caustica* mantiene una alta variabilidad química, la identificación de la cetona 16-hentriacontanona en sus ceras cuticulares (aunque en menor proporción que en *P. lingue* y *C. alba*) reafirma la hipótesis que postula la presencia de este compuesto químico como un contribuyente clave a la inflamabilidad. Cabe recordar, asimismo, que las clasificaciones de inflamabilidad son relativas a las especies evaluadas en cada caso. Por tanto, mientras una especie dentro de un conjunto dado de especies pueda ser clasificada como de baja inflamabilidad, en un contexto de especies nuevas puede ocupar otra posición relativa.

Las especies *C. odorifera* y *Q. saponaria* se agruparon como las menos inflamables, exhibiendo el mayor tiempo de ignición y la mayor duración de combustión total. Ambas comparten una composición química superficial particular, dada por una menor concentración total de ceras cuticulares (*Q. saponaria* representa apenas una décima parte de *P. lingue*) y una baja diversidad de compuestos químicos en comparación con el resto de las especies estudiadas. Esta baja concentración de ceras cuticulares podría predecir una menor inflamabilidad. Consistentemente con lo reportado por Guerrero (39, 26), *Q. saponaria* exhibe un patrón predominante en alcanos (hexacosano, octacosano y

nonacosano), y está caracterizada por su baja inflamabilidad, con tiempos de ignición cercanos a 20 s [19, 27]. El alcano nonacosano es un compuesto característico de esta especie y podría representar un patrón químico clave dentro de la familia Quillajaceae. Por su parte, diferentes estudios de *C. odorifera*, coinciden con nuestras observaciones de baja inflamabilidad [51, 52]. Su porcentaje de ignición fue notablemente baja (solo el 30% de los ensayos entró en ignición), siendo mucho menor que la observada en *Q. saponaria*. Una diferencia clave entre estas dos especies es la composición química predominante en sus ceras: mientras *Q. saponaria* es dominada por alcanos, *C. odorifera* presentó una mayor proporción de compuestos del grupo no-alcanos (aldehídos y cetonas). La presencia de la cetona 10-, 12- + 14-Heptacosanona (una mezcla de isómeros) representa una molécula compleja cuya estructura podría influir en las propiedades físicas de la mezcla de ceras, afectando la liberación de calor de una manera no lineal con la masa molecular y, consecuentemente, aumentando su punto de inflamación.

En nuestro estudio, los alcanos nonacosano y heptacosano se identificaron de manera consistente en las ceras cuticulares de todas las especies nativas analizadas. Ambos compuestos han sido reportados en altas concentraciones en especies mediterráneas [30], así como en las especies dominantes del ecosistema mediterráneo de Chile analizadas por su inflamabilidad [26, 39]. En este estudio, el nonacosano fue el alcano principal en *Q. saponaria* y mostró un claro predominio, similar al reportado para los robles mediterráneos siempreverdes, *Q. coccifera* y *Quercus ilex* [52, 53], e incluso fue reportado como el alcano de longitud máxima de cadena en especies del bosque templado andino, como *Araucaria araucana* [53]. La presencia de nonacosano y heptacosano en todas las especies nativas analizadas refleja su rol fundamental como alcano de cadena larga en la estructura de las ceras cuticulares dentro del ecosistema mediterráneo central de Chile, probablemente ligado a su rol principal de regulación eficiente de la pérdida de agua. Nuestro aporte, en el contexto de la inflamabilidad, fue demostrar que el nonacosano establece una relación positiva con la duración de la llama (a mayor contenido, la duración de la llama fue más duradera). Este hallazgo es crucial, ya que, a diferencia de los terpenos (cuya concentración es altamente variable), los hidrocarburos como el nonacosano son un componente estructural constante en la mayoría de las especies de la región. Con lo cual, su presencia y concentración puede ser un factor clave para estimar la sostenibilidad como componente de la inflamabilidad de los combustibles (i.e. tiempo que un combustible puede mantener la combustión; [18]). No obstante, la

combinación con otros compuestos más reactivos (como cetonas y aldehídos) parece ser lo que finalmente modula el riesgo de incendio.

En resumen, nuestros resultados demuestran la influencia positiva de las ceras cuticulares sobre la inflamabilidad, un hallazgo novedoso en Chile, lo que amplía el enfoque tradicional global centrado únicamente en los terpenos. La inflamabilidad no estuvo determinada principalmente por los alcanos (detectados en todas las especies), sino que se explicó consistentemente por la concentración del grupo de los no-alcanos. Se ha documentado que los alcanos son altamente resistentes a la degradación, conservando su estructura a lo largo del tiempo [54, 55]. Es plausible que la discrepancia con estudios previos, enfocados en hojarasca, se deba a que las hojas extraídas del dosel (analizadas aquí) contienen una mayor concentración y variabilidad de compuestos químicos reactivos que responden a estímulos ambientales y se encuentran sujetos a variables naturales como un contenido de humedad variable, respecto de la hojarasca. Específicamente, los compuestos no-alcanos presentes en las ceras cuticulares (cetonas y aldehídos), podrían ser los moduladores claves del riesgo de incendio, dando énfasis a la importancia de la caracterización de los compuestos químicos individuales y sus interacciones, lo que constituye uno de los principales aportes de este estudio. Sin embargo, en relación a nuestra hipótesis de trabajo, podemos decir que el rol de los alcanos cuticulares es complejo y dependiente del contexto químico; mientras juegan un rol positivo en la inflamabilidad, su contribución a la ignitabilidad de los tejidos vegetales parece depender de la interacción de los mismos con otros grupos de compuestos, tales como las cetonas, aldehídos y posiblemente los terpenos.

CONCLUSIÓN

Conclusión N°1: Nuestros resultados corroboran la hipótesis de que ciertas clases de compuestos químicos contenidos en las ceras cuticulares actúan como impulsores en la inflamabilidad foliar de las especies nativas del bosque esclerófilo.

Conclusión N°2: Se demostró que una mayor concentración total de ceras cuticulares se relaciona con una mayor inflamabilidad, particularmente con un menor tiempo de ignición y tiempo de combustión.

Conclusión N°3: El perfil químico de las ceras cuticulares es único para cada especie evaluada, determinándose que la fracción de compuestos no-alcanos es el principal contribuyente a la inflamabilidad foliar, destacándose la presencia del compuesto químico 16-hentriacontanona (cetona) en las especies más inflamables: *P. lingue* y *C. alba*.

Conclusión N°4: Las pruebas de inflamabilidad permitieron clasificar las especies en tres niveles de inflamabilidad:

- Alta inflamabilidad (*P. lingue* y *C. alba*): Mayor concentración de ceras dominadas por no-alcanos.
- Inflamabilidad intermedia (*L. caustica*)
- Baja inflamabilidad (*Q. saponaria* y *C. odorifera*): Menor contenido total de ceras.

Conclusión N°5: En el contexto de un bosque esclerófilo degradado y bajo estrés hídrico por el cambio climático, el estudio de estos rasgos químicos provee una base científica esencial. Estos hallazgos son indispensables para mejorar la gestión del fuego, integrar información química en modelos de evaluación de riesgos y construir paisajes más resilientes frente a futuros escenarios de incendios forestales.

REFERENCIAS

- [1] Gallo-Méndez, I., Clark, J., & Pastén, D. (2025). Time series analysis of wildfire propagation in Chile: A complex networks approach. *Chaos, Solitons & Fractals*, 196, 116347.
- [2] Duarte, E., Rubilar, R., Matus, F., Garrido-Ruiz, C., Merino, C., Smith-Ramirez, C., & Jofré, I. (2024). Drought and wildfire trends in native forests of South-Central Chile in the 21st century. *Fire*, 7(7), 230.
- [3] Gajendiran, K., Kandasamy, S., & Narayanan, M. (2024). Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. *Environmental Research*, 240, 117537.
- [4] Huang, K., Wu, X., Zhang, L., Geng, H., & Qu, Y. (2025). Increasing risk of global forest loss from extreme wildfires under climate change. *International Journal of Digital Earth*, 18(1), 2483982.
- [5] Pliscoff, P., Folchi, M., Aliste, E., Cea, D., & Simonetti, J. A. (2020). Chile mega-fire 2017: An analysis of social representation of forest plantation territory. *Applied geography*, 119, 102226.
- [6] Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED). (2024). Informe Consolidado Mega Incendios Forestales Región de Valparaíso, febrero 2024. Santiago, Chile [<https://wildfirex.cl/informe-incendios-02-y-03-de-febrero-de-2024-vina-del-mar-region-valparaiso/>]
- [7] Hinojosa, L. F., & Villagrán, C. (1997). Historia de los bosques del sur de Sudamérica, I: antecedentes paleobotánicos, geológicos y climáticos del Terciario del cono sur de América. *Revista Chilena de Historia Natural*, 70(2), 225-239.
- [8] Fares, S., Bajocco, S., Salvati, L., Camarretta, N., Dupuy, J. L., Xanthopoulos, G., ... & Corona, P. (2017). Characterizing potential wildland fire fuel in live vegetation in the Mediterranean region. *Annals of Forest Science*, 74(1), 1.
- [9] Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Chile. (2023/2024). Proyecciones Climáticas para Chile: Evidencia del Sexto Informe del IPCC. [<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>]
- [10] González, M. E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., ... & Castillo, I. (2020). Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. *Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)*, 2, 84.
- [11] Cueto, D. A., Alaniz, A. J., Hidalgo-Corrotea, C., Vergara, P. M., Carvajal, M. A., & Barrios-Saravia, A. (2025). Chilean Mediterranean forest on the verge of collapse? Evidence from a comprehensive risk analysis. *Science of The Total Environment*, 964, 178557.
- [12] Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.

- [13] Pereira, A. (2016). Plant abiotic stress challenges from the changing environment. *Frontiers in plant science*, 7, 1123.
- [14] Dudareva, N., Klempien, A., Muhlemann, J. K., & Kaplan, I. (2013). Biosynthesis, function and metabolic engineering of plant volatile organic compounds. *New Phytologist*, 198(1), 16-32.
- [15] Ormeno, E., Cespedes, B., Sanchez, I. A., Velasco-García, A., Moreno, J. M., Fernandez, C., & Baldy, V. (2009). The relationship between terpenes and flammability of leaf litter. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 471-482.
- [16] Pausas, J. G., Alessio, G. A., Moreira, B., & Segarra-Moragues, J. G. (2016). Secondary compounds enhance flammability in a Mediterranean plant. *Oecologia*, 180(1), 103-110.
- [17] Della Rocca, G., Madrigal, J., Marchi, E., Michelozzi, M., Moya, B., & Danti, R. (2017). Relevance of terpenoids on flammability of Mediterranean species: An experimental approach at a low radiant heat flux. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 10(5), 766.
- [18] Pausas, J. G., Keeley, J. E., & Schwilk, D. W. (2017). Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*, 105(2), 289-297.
- [19] Murray, B. R., Hardstaff, L. K., & Phillips, M. L. (2013). Differences in leaf flammability, leaf traits and flammability-trait relationships between native and exotic plant species of dry sclerophyll forest. *PloS one*, 8(11), e79205.
- [20] Ganteaume, A. (2018). Does plant flammability differ between leaf and litter bed scale? Role of fuel characteristics and consequences for flammability assessment. *International Journal of Wildland Fire*, 27(5), 342-352.
- [21] Anderson, H.E. (1970) Forest fuel ignitability. *Fire Technology*, 6, 312-319.
- [22] Romero, B., Fernandez, C., Lecareux, C., Ormeño, E., & Ganteaume, A. (2019). How terpene content affects fuel flammability of wildland-urban interface vegetation. *International journal of wildland fire*, 28(8), 614-627.
- [23] Dimitrakopoulos, A. P., & Papaioannou, K. K. (2001). Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology*, 37(2), 143-152.
- [24] Bianchi, L. O., Oddi, F. J., Muñoz, M., & Defossé, G. E. (2019). Comparison of leaf moisture content and ignition characteristics among native species and exotic conifers in Northwestern Patagonia, Argentina. *Forest Science*, 65(4), 375-386.
- [25] Ormeno, E., Cespedes, B., Sanchez, I. A., Velasco-García, A., Moreno, J. M., Fernandez, C., & Baldy, V. (2009). The relationship between terpenes and flammability of leaf litter. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 471-482.
- [26] Guerrero, F., Espinoza, L., Carmona, C., Blackhall, M., Quintero, C., Ocampo-Zuleta, K., ... & Toledo, M. (2024). Unraveling the chemistry of plant flammability: Exploring the role of volatile secondary metabolites beyond terpenes. *Forest Ecology and Management*, 572, 122269.

- [27] Shepherd, T., & Wynne Griffiths, D. (2006). The effects of stress on plant cuticular waxes. *New Phytologist*, 171(3), 469-499.
- [28] Martins, C. M. C., Mesquita, S. M. M., & Vaz, W. L. C. (1999). Cuticular waxes of the holm (*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) and cork (*Q. suber* L.) oaks. *Phytochemical Analysis: An International Journal of Plant Chemical and Biochemical Techniques*, 10(1), 1-5.
- [29] Huang, H., Burghardt, M., Schuster, A. C., Leide, J., Lara, I., & Riederer, M. (2017). Chemical composition and water permeability of fruit and leaf cuticles of *Olea europaea* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(40), 8790-8797.
- [30] Ormeño, E., Ruffault, J., Gutigny, C., Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., & Ballini, C. (2020). Increasing cuticular wax concentrations in a drier climate promote litter flammability. *Forest Ecology and Management*, 473, 118242.
- [31] Heredia, A., & Dominguez, E. (2009). The plant cuticle: a complex lipid barrier between the plant and the environment. An overview. *Counteraction to Chemical and Biological Terrorism in East European Countries*, 109-116.
- [32] Martins, C. M. C., Mesquita, S. M. M., & Vaz, W. L. C. (1999). Cuticular waxes of the holm (*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) and cork (*Q. suber* L.) oaks. *Phytochemical Analysis: An International Journal of Plant Chemical and Biochemical Techniques*, 10(1), 1-5.
- [33] Huang, H., Burghardt, M., Schuster, A. C., Leide, J., Lara, I., & Riederer, M. (2017). Chemical composition and water permeability of fruit and leaf cuticles of *Olea europaea* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(40), 8790-8797.
- [34] Zhang, Y. L., You, C. X., Li, Y. Y., & Hao, Y. J. (2020). Advances in biosynthesis, regulation, and function of apple cuticular wax. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1165.
- [35] 23Cerdeña-Peña, C., & Contreras, S. (2022). Characterization and chemo-taxonomic evaluation of plant leaf waxes (long chain n-alkanoic acids, n-alkanes and n-alkanols) as a vegetation biomarker from species of the South American temperate forest (STF). *Ecological Indicators*, 136, 108675.
- [36] 24Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73.
- [37] CONAF, 1996. Plan de manejo Reserva Nacional Río Clarillo. Unidad de Gestión Patrimonio Silvestre. Santiago de Chile. 115p.
- [38] Hauenstein, E., Muñoz-Pedreros, A., Yáñez, J., Sánchez, P., Möller, P., Guiñez, B., & Gil, C. (2009). Flora y vegetación de la Reserva Nacional Lago Peñuelas, Reserva de la Biósfera, Región de Valparaíso, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 30(3), 159-179.
- [39] Guerrero, F., Hernández, C., Toledo, M., Espinoza, L., Carrasco, Y., Arriagada, A., ... & Carmona, C. (2021). Leaf thermal and chemical properties as natural drivers of plant

flammability of native and exotic tree species of the Valparaíso region, Chile. *International journal of environmental research and public health*, 18(13), 7191.

[40] Valette, J. C. (1990). Inflammabilités des espèces forestières méditerranéennes. Conséquences sur la combustibilité des formations forestières. *Revue forestière française*, 42(Spécial), 76-92.

[41] Lenth, R. (2025). Response-Surface Analysis [R package rsm version 2.10. 6].

[42] Brooks, M. E., Kristensen, K., van Benthem, K. J., Magnusson, A., Berg, C. W., Nielsen, A., Skaug, H. J., Maechler, M., & Bolker, B. M. (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R Journal*, 9(2), 378–400.

[43] Wickham H., François R., Henry L. and Müller K. (2024). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

[44] Frank E Harrell Jr (2024). Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 5.1-1. <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>

[45] Jeffree, C. E. (2006). The fine structure of the plant cuticle. *Biology of the plant cuticle*, 23, 11-125.

[46] Eglinton, G., & Hamilton, R. J. (1967). Leaf Epicuticular Waxes: The waxy outer surfaces of most plants display a wide diversity of fine structure and chemical constituents. *science*, 156(3780), 1322-1335.

[47] Heredia, A., Heredia-Guerrero, J. A., Domínguez, E., & Benítez, J. J. (2009). Cutin synthesis: A slippery paradigm. *Biointerphases*, 4(1), P1-P3.

[48] Alessio, G. A., Peñuelas, J., Llusà, J., Ogaya, R., Estiarte, M., & De Lillis, M. (2008). Influence of water and terpenes on flammability in some dominant Mediterranean species. *International Journal of Wildland Fire*, 17(2), 274-286.

[49] Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Lampin, C. (2013). A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental management*, 51(3), 651-662.

[50] Rodríguez, R., Marticorena, C., Alarcón, D., Baeza, C., Cavieres, L., Finot, V. L., ... & Marticorena, A. (2018). Catálogo de las plantas vasculares de Chile. *Gayana. Botánica*, 75(1), 1-430.

[51] Montenegro, G., Santander, F., Jara, C., Nunez, G., & Fredes, C. (2013). Antioxidant and antimicrobial activity of unifloral honeys of plants native to Chile.

[52] Niemeyer, H. M. (1995). Biologically active compounds from Chilean medicinal plants. In *Phytochemistry of medicinal plants* (pp. 137-159). Boston, MA: Springer US.

- [53] Cerda-Peña, C., Contreras, S., & Rau, J. R. (2020). Molecular n-alkyl leaf waxes of three dominant plants from the temperate forest in South America. *Organic Geochemistry*, 149, 104105.
- [54] Norström, E., Katrantsiotis, C., Smittenberg, R. H., & Kouli, K. (2017). Chemotaxonomy in some Mediterranean plants and implications for fossil biomarker records. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 219, 96-110.
- [55] Schemmel, F., Niedermeyer, E. M., Schwab, V. F., Gleixner, G., Pross, J., & Mulch, A. (2016). Plant wax δD values record changing Eastern Mediterranean atmospheric circulation patterns during the 8.2 kyr BP climatic event. *Quaternary Science Reviews*, 133, 96-107.

ANEXOS

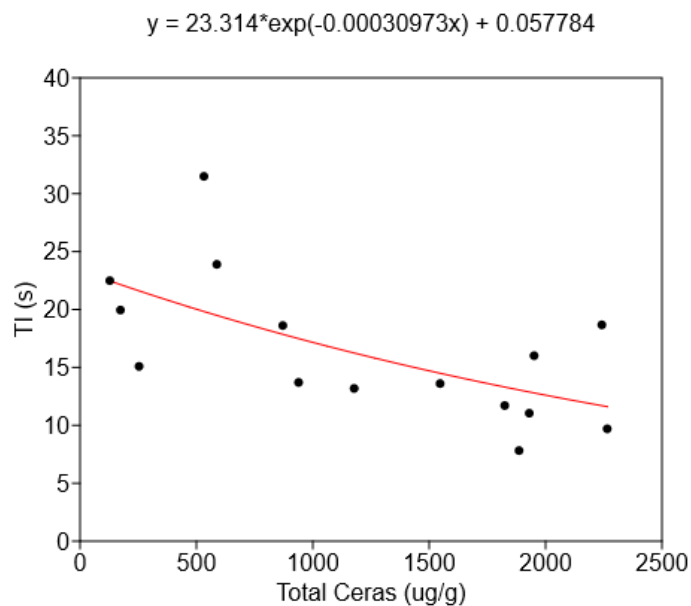


FIGURA 15: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN EXPONENCIAL PARA LA RELACIÓN ENTRE TOTAL CERAS Y TI. $R^2=0,4005$ AKAIKE=331,89.

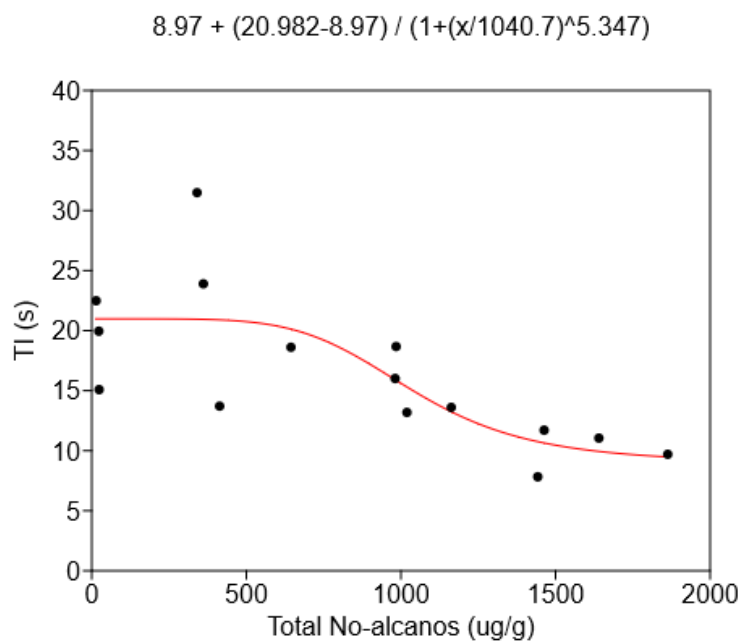


FIGURA 16: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HILL PARA LA RELACIÓN ENTRE TOTAL NO-ALCANOS Y TI. $R^2=0,5641$, AKAIKE=247,39.

$$-31.656 + (22.39 - 31.656) / (1 + (x/3.8037E05)^{0.21336})$$

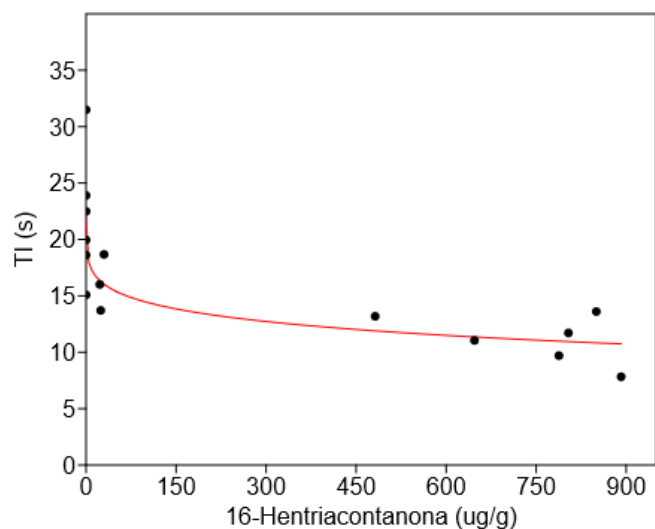


FIGURA 17: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HILL PARA LA RELACIÓN ENTRE 16-HENTRIACONTANONA Y TI. R²=0,646, AKAIKE=203,15.

$$y = 53.281 \cdot \exp(-0.00067633x) + 53.048$$

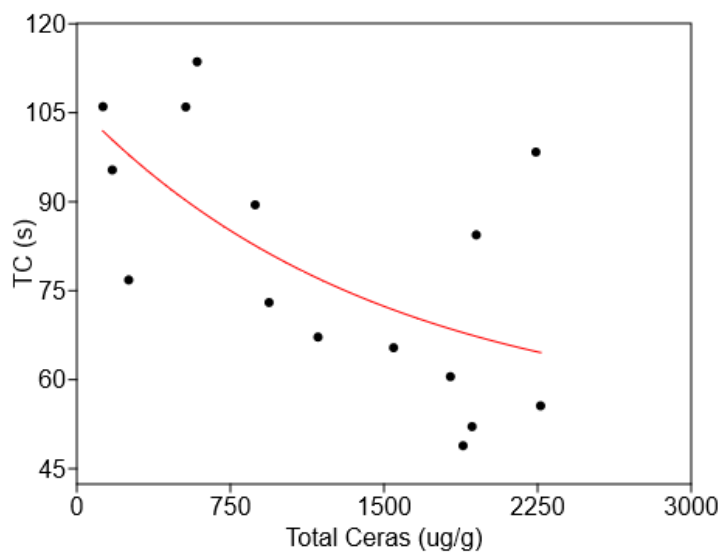


FIGURA 18: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN EXPONENCIAL PARA LA RELACIÓN ENTRE TOTAL CERAS Y TC. R²=0,4032, AKAIKE=3780,20.

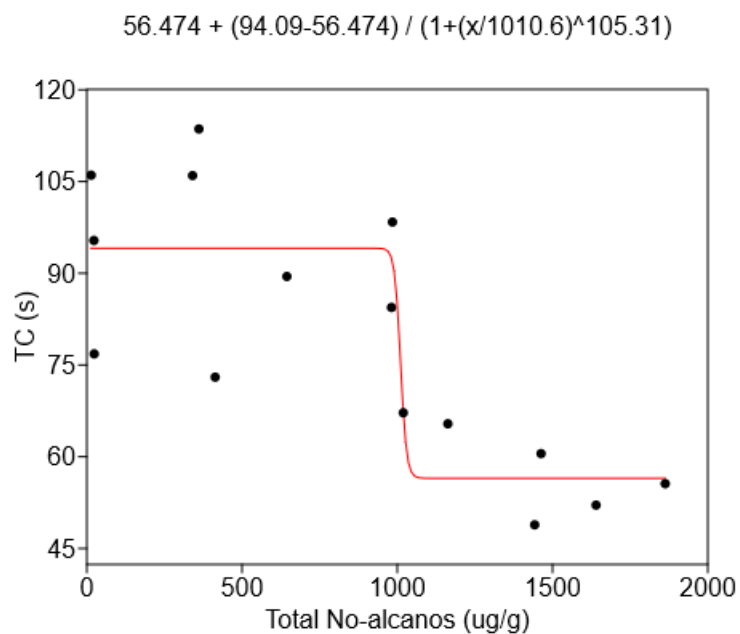


FIGURA 19: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HILL PARA LA RELACIÓN ENTRE TOTAL NO ALCANOS Y TC. $R^2=0,7293$, AKAIKE=1722,9.

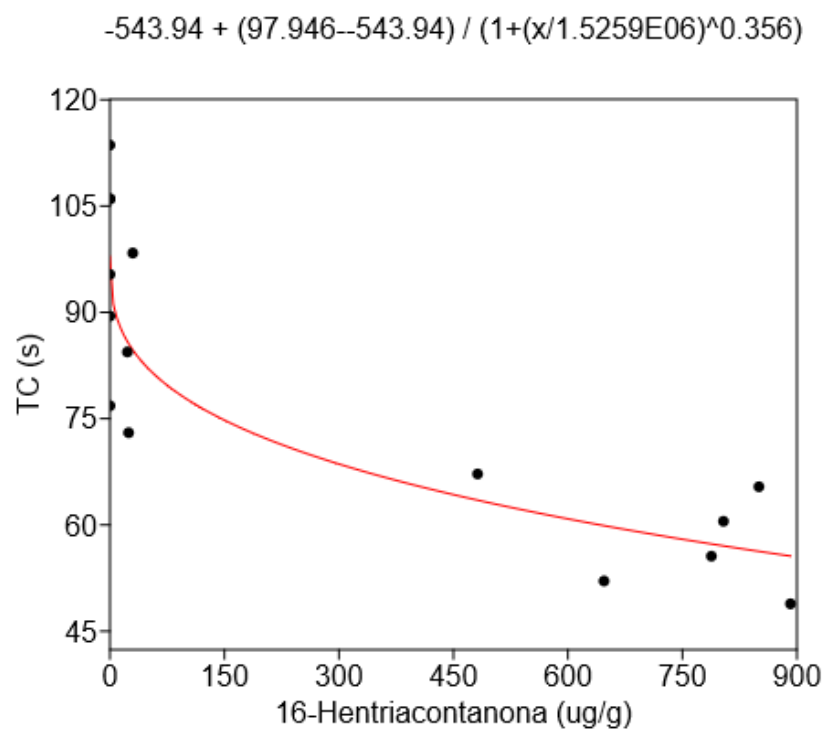


FIGURA 20: AJUSTE NO LINEAL MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HILL PARA LA RELACIÓN ENTRE 16-HENTRIACONTANO Y TC. $R^2=0,4032$, AKAIKE=3780,2.