UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2018

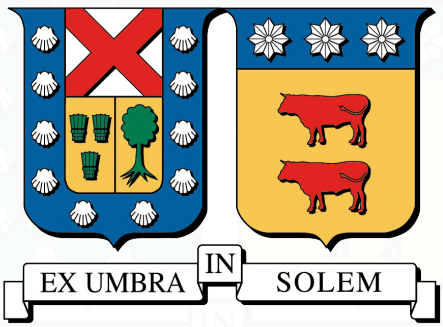
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TIEMPO DE IGNICIÓN PARA UN LECHO POROSO REPRESENTATIVO DE UN COMBUSTIBLE FORESTAL

WESTON FERNÁNDEZ, CRISTÓBAL ANDRÉS

http://hdl.handle.net/11673/24622

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE



ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TIEMPO DE IGNICIÓN PARA UN LECHO POROSO REPRESENTATIVO DE UN COMBUSTIBLE FORESTAL

CRISTÓBAL ANDRÉS WESTON FERNÁNDEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA	:	SR. ANDRÉS FUENTES C.
PROFESOR CORREFERENTE	:	SR. JORGE CONTRERAS R.

ENERO 2018

EX UMBRA
IN
SOLEM

A mi familia y amigos. . .

EX UMBRA
IN
SOLEM

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiese sido posible sin la ayuda y apoyo de cada una de las personas que han sido parte mi vida, de mi formación académica y, aún más importante, de mi formación como persona.

Los hechos vividos definen a las personas, su filosofía de vida queda condicionada por el entorno y es el tiempo el que se encarga de moldearla. Cada individuo que cruzó su camino con el mio, dejó alguna huella que me a llevado a ser lo que soy.

A todos ellos, gracias.

EX UMBRA
IN
SOLEM

RESUMEN EJECUTIVO

Año a año se producen alrededor del mundo innumerables catástrofes cuyo protagonista es el fuego. Si bien ha formado parte del ciclo natural desde tiempos inmemorables, es indiscutible el hecho de que es el ser humano el culpable de la mayor parte de los siniestros generados, alterando el orden natural del planeta. Existen registros históricos de incendios que arrasaron millones de hectáreas y destruyeron ciudades, donde los daños son extremadamente altos, no solo para las personas, también para todo el ecosistema.

Un estudio experimental sobre la ignición espontánea de un lecho poroso representativo de un combustible forestal, acículas de pino radiata, bajo un contexto de propagación por *spotting* fue llevado a cabo. Este mecanismo por el cual el frente del incendio puede propagarse, consiste en el desprendimiento de partículas incandescentes, con o sin presencia de llama, que viajan producto de las corrientes de aire producidas por el microclima generado en un incendio forestal, estas partículas viajan de un lugar a otro, en muchos casos, alcanzando material vegetal combustible, pudiendo provocar la ignición de nuevos focos. La pavesa fue idealizada y las condiciones del estrato controladas. Mediante el uso del aparato experimental IFIT, se busca entender la relación existente principalmente entre el tiempo de ignición, t_{ig}, y el flujo radiativo incidente, $\dot{q}''_{inc}$.

La geometría del heater fue determinada de tal forma que sea representativa de pavesas reales encontradas en incendios forestales controlados y el material elegido el idóneo dentro de las opciones disponibles en el mercado. El flujo radiativo incidente fue disminuido sistemáticamente, partiendo de un flujo que garantice la ignición hasta encontrar el flujo de radiación crítico incidente, $\dot{q}''_{inc,cri}$, flujo máximo al cual la ignición no ocurre.

En base a las características de las plantaciones forestales en Chile, *Pinus Radiata* fue la variedad escogida, debido al alto porcentaje que representa este tipo de vegetación en la zona central del país, donde se genera la mayor cantidad de incendios forestales. Acículas del pino mencionado fueron dispuestos en un recipiente portamuestras de forma anular en distintas proporciones, siendo las fraccines en volumen (α_{fuel}) establecidas de 0.01, 0.03, 0.05, 0.07 y 0.09 para ser sometidas a la radiación emitida por la fuente de calor introducida al interior de la muestra.

Más de 380 experimentos fueron llevados a cabo exitosamente, los cuales muestran una relación cuasi-lineal entre el inverso del tiempo de ignición ($1/t_{ig}$) y el flujo de radiación incidente ($\dot{q}''_{inc}$), relación que es observada en materiales que pueden ser aproximados como thermally thin. Los flujos críticos incidentes respectivos para cada fracción de porosidad mencionados anteriormente son: 20.58, 15.02, 11.26, 8.25 y 6.45 kW/m^2, desde $\alpha_{fuel} = 0{,}01$ hasta $\alpha_{fuel} = 0{,}09$. La evolución de la temperatura a lo largo de un experimento no puede ser considerada cuasi-lineal hasta alcanzar la ignición al menos en la superficie más cercana al heater, además existe un espesor de penetración del calor incidente, tras el cual los efectos son despreciables. A diferencia de la temperatura, la pérdida de masa hasta antes del momento en que ocurre la ignición sí tiene un comportamiento cuasi-lineal.

Ya sea por el comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso o por la pérdida de masa, es posible determinar el momento en el cual ocurre la ignición producto del cambio abrupto de la pendiente de ambas curvas. En la mayor parte de los casos el cambio es evidente, no obstante, existen ciertas mediciones en las cuales no es posible apreciar la variación en las pendientes, por lo que el método más confiable es por medio de reconocimiento visual y el uso de un cronómetro.

Este estudio resulta ser un pequeño aporte a la comunidad científica en su búsqueda por el entendimiento de los incendios forestales, para que de esta forma sea posible evitar catástrofes como las que han azotado ciudades como California en la actualidad o Valparaíso años anteriores. Es importante la continuidad para poder generar medidas preventivas que apacigüen los daños y con la información recavada, mejorar las estrategias y tácticas de combate ante incendios forestales.

EX UMBRA
IN
SOLEM

Índice de Contenidos

1. Introducción y Antecedentes **1**
1.1. Introducción . . . 1
1.2. Antecedentes . . . 2
1.2.1. Incendios Forestales en el Mundo . . . 2
1.2.2. Incendios Forestales en Chile . . . 3
1.2.2.1. Contexto General . . . 3
1.2.2.2. Vegetación . . . 3
1.3. Alcance . . . 5
1.4. Objetivos . . . 7
1.4.1. Objetivo General . . . 7
1.4.2. Objetivos Específicos . . . 7

2. Marco Teórico **9**
2.1. Transferencia de Calor . . . 9
2.1.1. Descripción General . . . 9
2.1.2. Conducción . . . 9
2.1.3. Convección . . . 10
2.1.4. Radiación . . . 10
2.2. Teoría de la Ignición de Sólidos . . . 11
2.2.1. Descripción General . . . 11
2.2.2. Generación de Gases de Pirólisis . . . 12
2.2.3. Difusión de Gases de Pirólisis y Aire Ambiente . . . 12
2.2.4. Tipos de Ignición . . . 13
2.2.4.1. Piloteada . . . 13
2.2.4.2. Espontánea . . . 13
2.2.5. Aproximación Thermally Thin y Thermally Thick . . . 14
2.2.6. Consideraciones . . . 14
2.2.6.1. Charring . . . 14
2.2.6.2. Flujo Crítico de Ignición . . . 15
2.2.6.3. Temperatura de Ignición y Tiempo de Ignición . . . 15
2.3. Física del Fuego: Incendios Forestales . . . 16
2.3.1. Descripción General . . . 16
2.3.2. Condiciones Necesarias . . . 17
2.3.3. Mecanismos de Propagación . . . 18
2.3.3.1. Subsuelo . . . 18
2.3.3.2. Superficial . . . 18
2.3.3.3. Por Copas . . . 18
2.3.3.4. Spotting . . . 19
2.4. Biomasa . . . 20
2.4.1. Densidad de Masa . . . 20
2.4.2. Densidad Aparente . . . 20

2.4.3. Packing Ratio y Porosidad . . . 21
2.4.4. Relación Superficie-Volumen . . . 22
2.5. Análisis Estadístico . . . 22

3. Diseño Experimental **25**
3.1. Variables Respuesta . . . 25
3.2. Montaje Experimental . . . 25
3.2.1. Descripción General . . . 25
3.2.2. Componentes del Montaje Experimental . . . 26
3.2.2.1. Heater . . . 26
3.2.2.2. Otros Componentes . . . 28

4. Metodología **31**
4.1. Caracterización del Heater . . . 31
4.1.1. Perfil de Radiación Incidente . . . 31
4.1.2. Radiómetros Medtherm . . . 35
4.2. Caracterización de la Biomasa . . . 36
4.2.1. Relación Superficie-Volumen . . . 36
4.2.2. Densidad de Masa . . . 36
4.2.3. Preparación de la Muestra . . . 39
4.2.4. Distribución del Estrato Vegetal . . . 39
4.3. Procedimiento Experimental . . . 42
4.3.1. Descripción General . . . 42
4.3.2. Tiempo de Ignición . . . 42
4.3.3. Temperatura del Estrato Vegetal . . . 43
4.3.4. Pérdida de Masa (MLR) . . . 43
4.3.5. Flujo Crítico Incidente . . . 43
4.4. Estimación del Error Experimental . . . 44

5. Resultados Experimentales **45**
5.1. Tiempo de Ignición . . . 45
5.2. Flujo Crítico Incidente . . . 46
5.3. Temperatura del Estrato . . . 47
5.4. Pérdida de Masa . . . 49
5.5. Error Experimental . . . 51

6. Conclusiones y Comentarios **55**

Bibliografía **59**

Índice de Tablas

1.1. Catastro de uso de suelos y recursos vegetacionales a Enero de 2016 (CONAF, 2016). 7

2.1. Tipos de incendios forestales según el tipo de combustible (Sugihara, 2006) 17

3.1. Propiedades físicas y radiativas del Si_3N_4 27

4.1. Voltaje, intensidad de corriente y flujo radiativo incidente $\dot{q}''_{inc}$. 34
4.2. Parámetros del proceso de caracterización del heater. 34
4.3. Mediciones de ϕ_{fuel}, l_{fuel} y ω para agujas de pino radiata. 37
4.4. Resumen densidad de masa y relación superficie-volumen de acículas de pino para distintas variedades 37
4.5. Densidad de masa de nuestras de pino radiata medidas experimentalmente 38
4.6. Masa inicial $m_{fuel,i}$, densidad aparente ρ_b y la fracción en volumen de material combustible α_{fuel} con los cuales se trabajó. 41
4.7. Rango de profundidad de la capa y promedios de densidad aparente para estratos no descompuestos (Ottmar y Andreu, 2007). 41
4.8. Rango de profundidad de la capa y promedios de densidad aparente para estratos descompuestos (Ottmar y Andreu, 2007). 41

5.1. Flujo crítico de radiación incidente $\dot{q}''_{inc,cri}$ para cada fracción en volumen α_{fuel}. 46

EX UMBRA
IN
SOLEM

Índice de Figuras

1.1. Distribución espacial de incendios y principales áreas de riesgo. 4
1.2. Ocurrencia de incendios forestales y superficie afectada anualmente desde 1964 hasta Septiembre de 2017 (CONAF, 2017b). 5
1.3. Pino radiata y sus componentes. 6

2.1. Esquema de los tiempos característicos involucrados en la ignición de una placa plana (Torero, 2016). 13
2.2. Mecanismos de Propagación: Casos Reales. 16
2.3. Superficie calculada en función de la masa de las pavesas (Manzello et al., 2009). 19
2.4. Descripción gráfica del proceso de propagación en un incendio forestal. 20
2.5. Ejemplo ilustrado de cálculo de densidad aparente (Keane, 2015). 21

3.1. Vista general del montaje experimental IFIT. 26
3.2. Vista y dimensionamiento del heater (Bach RC). 27
3.3. Información de la resistencia eléctrica y radiación emitida por el heater (Bach RC) 28

4.1. Flujo radiativo total emitido por el heater e incidente en el estrato vegetal a distintos voltajes. 33
4.2. Flujo radiativo incidente en z y $r = r_i$ a distintos voltajes. 33
4.3. Proceso de Calibración 35
4.4. Muestra escaneada de agujas de pino. 36
4.5. Fracciones en volumen experimentales trabajadas. 40

5.1. Tiempo de ignición a diferentes flujos radiativos incidentes y porosidades. 47
5.2. Evolución temporal y espacial de la temperatura del estrato vegetal antes de la ignición. . . . 48
5.3. Evolución de la temperatura del estrato vegetal cuando no se produce ignición. 49
5.4. Evolución temporal de η. 50
5.5. Evolución temporal de η. 51
5.6. Estimación del error experimental de t_{ig} y $\dot{q}''_{inc}$. 52
5.7. Estimación del error experimental de η y T_{ig}. 52

EX UMBRA
IN
SOLEM

1 | Introducción y Antecedentes

1.1. Introducción

Desde tiempos inmemorables, el fuego ha tenido un rol protagónico en la historia de la humanidad, siendo su descubrimiento un punto de inflexión en la evolución del hombre, convirtiéndose en una herramienta imprescindible en el diario vivir, siendo una fuente de luz y calor, lo cual sirvió como medio de protección frente a depredadores, además se comenzaron a cocinar alimentos e incluso se utilizó para la construcción de diversas herramientas que marcaron nuestra evolución. Este nuevo orden social dio paso a un desarrollo cognitivo crucial, permitiendo expandir las fronteras de las capacidades cerebrales, siendo ésta última la principal herramienta que posee el ser humano hasta el día de hoy. Son innumerables los beneficios que entrega la manipulación de este fenómeno físico-químico, pero consigo existe una tremenda responsabilidad.

No sólo beneficios ha traído el supuesto dominio y control sobre este elemento de la naturaleza, episodios catastróficos acontecidos a lo largo de la historia han tenido como protagonista el fuego, siendo el factor humano un denominador común. Dolan (2001) habla sobre un incendio que en cinco días arrasó con Londres en 1666, James (2002) narra las consecuencias del terremoto y posterior incendio acaecidos en la ciudad de Japón el año 1923 donde murieron cerca de 142 mil personas. Un infierno en la ciudad de Valparaíso es relatado por Purcell (2017) tras el bombardeo por parte de una escuadra española a la ciudad puerto el año 1866 dando lugar a un sinnúmero de incendios. Éstas son solo algunas muestras del daño que puede ser provocado.

Investigaciones sobre combustión, proceso de ignición, propagación, entre otras, son la reacción de la comunidad científica frente a tal poder destructivo, buscando establecer medidas de protección y prevención frente ante este tipo de acontecimientos. El fuego puede tomar muchas formas distintas, en todas ellas existen reacciones químicas entre materias combustibles y aire (Drysdale, 2011). Corporación Nacional Forestal (CONAF) (2015), Corporación Nacional Forestal, define un incendio forestal como “fuego que, cualquiera sea su origen, se propaga sin control en terrenos rurales a través de vegetación leñosa, arbustiva o herbácea, ya sea viva o muerta”. Un hecho sin precedentes se dio lugar en Chile en los meses de Enero y Febrero de 2017, cerca de 600 mil ha fueron consumidas en 20 días, el grupo especializado de respuesta a emergencias de la Unión Europea (LEMA por sus siglas en inglés) catalogó este incendio como sexta generación en una escala que sólo llegaba hasta la quinta, siendo el incendio más destructivo registrado en el mundo (Gobierno de Chile, 2017b).

Las zonas que se encuentran en transición entre espacios urbanizados y silvestres se conoce como *zona de interfaz urbano-forestal*, WUI por sus siglas en inglés (Olmo et al., 2013), situación cada vez más común, donde el crecimiento demográfico hacia zonas periféricas se ha visto acrecentado. Incendios en estas zonas

representan un peligro potencial a las comunidades, donde rápidamente un incendio que se inicia en un sector forestal es capaz de alcanzar viviendas y edificaciones, poniendo en peligro la vida de las personas.

Las consecuencias de un incendio forestal van más allá de los daños provocados a las personas. Bosques nativos desaparecen por la destrucción generada por las llamas dando lugar a la proliferación de vegetación invasora, animales pierden su hábitat y fuentes de alimento, muchos de ellos pierden la vida por el fuego mismo o por las secuelas que éste trae, los gases emanados por la combustión contaminan el aire, principal fuente de vida, el ecosistema se ve alterado por el efecto sobre las aguas y el suelo erosionado. Toda la biodiversidad del planeta sufre las consecuencias.

A pesar de que una cierta cantidad de incendios tiene origen en causas naturales e inclusive son parte esencial en el desarrollo de los ecosistemas, es el hombre el responsable de la gran mayoría de éstos, propiciando directa o indirectamente la proliferación cada vez mayor de éstos. En su afán por el desarrollo y crecimiento económico no existen barreras que impidan alcanzar su objetivo, mientras un pequeño grupo lucha por un mejor lugar donde vivir, otro se encarga de destruirlo.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Incendios Forestales en el Mundo

El fuego es parte del ciclo de la naturaleza y a estado presente desde los inicios de la vegetación, mucho tiempo antes de la presencia del ser humano en la tierra. Condiciona los patrones de vegetación al impedir que los ecosistemas alcancen la altura y la biomasa esperada si sólo de factores climáticos se tratase (Bond et al., 2005) teniendo un rol importante en el transcurso de la historia. Si bien los incendios han sido parte del proceso desde tiempos inmemorables, es el accionar del hombre el que ha roto este balance con su accionar, ya sea deliberada o accidentalmente, de forma directa o indirecta.

Rusia, Malasia y Australia tuvieron los incendios más devastadores en cuanto a superficie afectada de los que se tiene registro, el primero de ellos arrasó con 14.4 millones de ha al este de Rusia y Siberia. En Sudamérica Argentina lidera la lista con un millón de hectáreas afectadas, seguido por Chile con el gran incendio del verano austral del 2017, afectando alrededor de 600 mil ha. Frecuentes son los incendios en países mediterráneos como España, Portugal, Grecia y sur de Italia y Francia, a los que se les suma Indonesia, Australia, Malasia, Singapur, Alemania, Estados Unidos, Brasil, Chile y muchos más.

Como es posible apreciar, los incendios forestales no conocen de fronteras, si bien hay lugares que entregan condiciones idóneas para el sustento de un incendio, son variados los climas y lugares en los que se pueden desarrollar.

La expansión demográfica hacia zonas periféricas colindantes con bosques y pastizales es un fenómeno que tiene precedente en el estado de California, Estados Unidos luego de un intenso proceso de suburbanización, que luego se expandió al mediterráneo y el resto del mundo. Desde hace algunas décadas ha sido una de la aristas en la investigación de los incendios forestales, llegando a catalogar este fenómeno como una nueva generación de incendios forestales (Greenpeace, 2015).

Nuevamente Chile, en particular la ciudad de Valparaíso, es un caso emblemático, donde en Abril del año 2014 más de 3000 viviendas fueron arrasadas por un incendio WUI sin precedentes.

1.2.2. Incendios Forestales en Chile

1.2.2.1. Contexto General

A lo largo de su historia Chile ha sido afectado constantemente por incendios forestales. Gran parte de su territorio posee un ecosistema mediterráneo y una clara estacionalidad con períodos prolongados de sequía factores que, sumados al factor humano, dan lugar a las condiciones necesarias para que se inicie el fuego y se propague, llevando a daños considerables, incluso terminando con la vida de algunas personas.

Existe una alta concentración espacial en las ocurrencias de los incendios forestales en Chile. Estudios realizados por el Laboratorio de Incendios Forestales de la Universidad de Chile, junto a los registros históricos de CONAF, han conseguido establecer lugares críticos de ocurrencias de incendios forestales, lo que implica una mayor probabilidad de que se produzca un incendio de gran envergadura (Castillo et al., 2015). Las zonas centro y sur son las que poseen mayor cantidad de incendios forestales y a su vez, mayor superficie afectada, como se puede visualizar en la Fig. 1.1a.

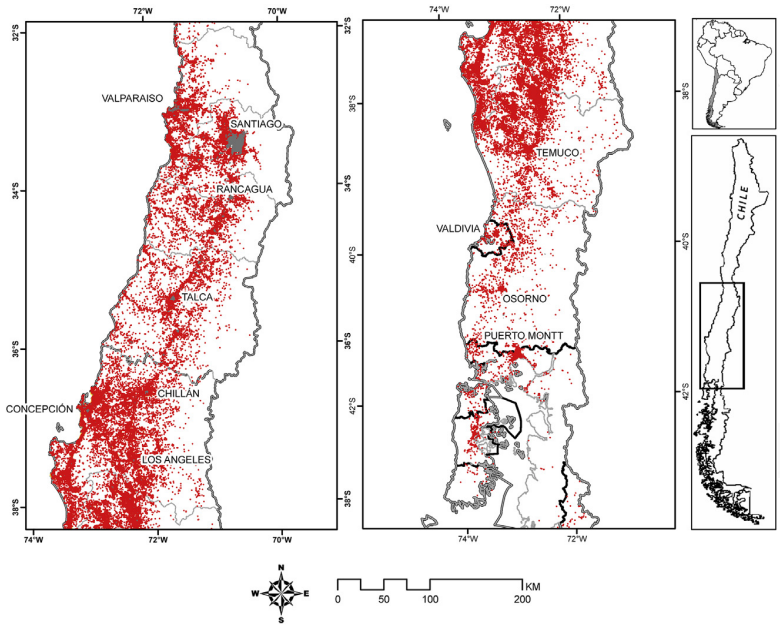
Como se puede ver en las Fig. 1.1a y 1.1b, las principales concentraciones de ocurrencia y riesgo de incendios forestales evidentemente se encuentran cerca de las principales urbes de cada región, Valparaíso, San Antonio, Santiago, Concepción y Chillán destacan en los mapas señalados. Esto es consistente con el crecimiento demográfico señalado anteriormente, donde las viviendas se entremezclan con zonas boscosas, viéndose acrecentados los potenciales daños que se podrían producir al afectar viviendas y edificaciones en zonas WUI. Casi la totalidad de los incendios forestales tienen origen en el accionar del hombre (Castillo et al., 2015), por lo que mayor densidad poblacional podría directa relación con la ocurrencia de este tipo de emergencias. El detalle de las causas de los incendios forestales puede ser agrupado por región (CONAF, 2017a).

Según los registros históricos entregados por CONAF (2017b), entre 1964 y septiembre de 2017 han habido 234,702 incendios forestales en territorio nacional, afectando 3,134,848 ha. En la Fig. 1.2 se muestra la evolución de estos acontecimiento con el pasar de los años. Si bien la tecnología para medir la superficie afectada con precisión es relativamente moderna, los datos pueden llegar a ser una buena referencia. Las estadísticas muestran que desde el año 2012 en promedio han ocurrido 6,418 incendios quemando 172,810 ha cada año, no obstante, esta información no cuantifica los daños provocados al ecosistema y a las personas.

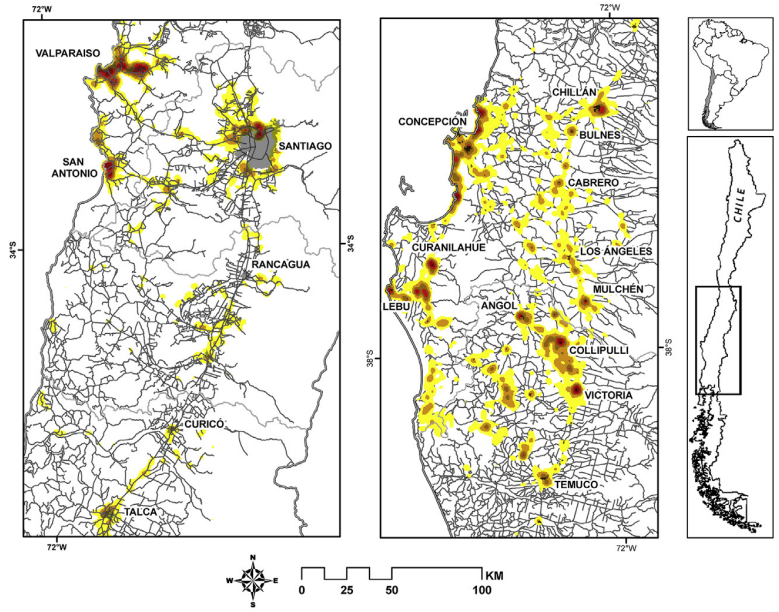
En términos generales, el registro histórico señalado en la Fig. 1.2 evidencia un aumento considerable de los eventos incendiarios hasta 1984 aproximadamente, estabilizándose y teniendo una pequeña alza año a año.

1.2.2.2. Vegetación

Chile se encuentra en la costa oeste de América del Sur, extendiéndose alrededor de 4,300 km desde el límite con Perú por el norte hasta el extremo sur sur del continente en el Cabo de Hornos, desde el paralelo 17°30’ S hasta el el paralelo 56° S, colindando con el Océano Pacífico por el occidente y la Cordillera de Los Andes por el oriente (Caviedes et al., 2017). Posee una población total de 17.574.003 habitantes (Gobierno de Chile, 2017a) resultando en una densidad aproximada de 23.25 hab/km^2. Esta información es de vital



(a) Distribución espacial de incendios forestales en Chile, período entre 1993 y 2003 (Castillo et al., 2015).



(b) Principales áreas de riesgo de incendio forestal, definidas por áreas críticas con un historial de incendios. Mayores densidades se muestran más oscuras (Castillo et al., 2015).

Figura 1.1: Distribución espacial de incendios y principales áreas de riesgo.

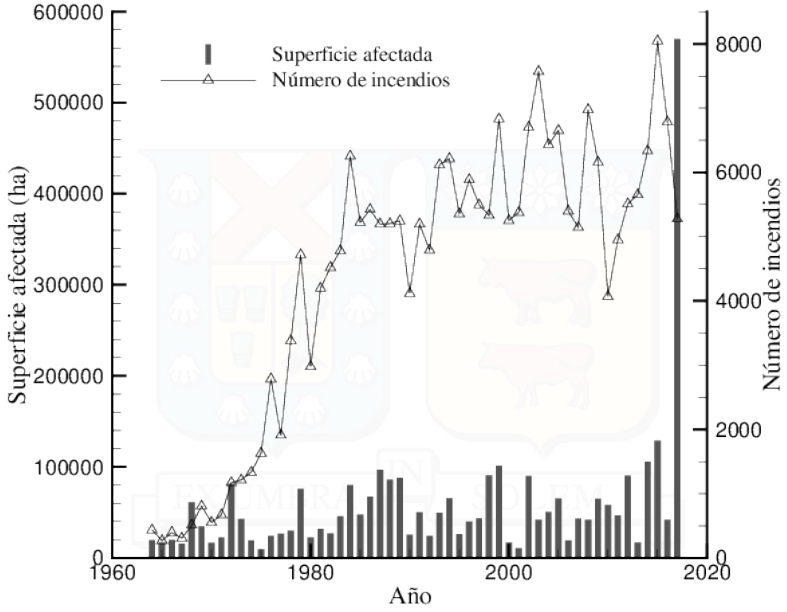


Figura 1.2: Ocurrencia de incendios forestales y superficie afectada anualmente desde 1964 hasta Septiembre de 2017 (CONAF, 2017b).

importancia para la comprensión de la distribución de la vegetación y en parte, de los incendios forestales que acontecen año a año.

Cerca de 17.5 millones de hectáreas corresponden a bosques (23.1 % del territorio nacional), de los cuales, 14.3 millones corresponden a bosques nativos y 3.05 millones a plantaciones forestales (4 % del territorio nacional) según el catastro oficial de usos de suelos elaborado por CONAF (2016). El detalle de este catastro se muestra en la Tabla 1.1, en la cual también se aprecia el porcentaje de pino de radiata en base a las plantaciones forestales, dato importante si se considera que la biomasa utilizada en este estudio se compone de acículas de pino de radiata. El total de hectáreas plantadas de esta variedad de pino se encuentra cerca de 1.9 millones.

1.3. Alcance

El enfoque de este estudio se basa en principalmente en la realización de experimentos que reproducen el fenómeno idealizado de spotting, donde un proceso de ignición espontánea de un estrato vegetal es llevado a cabo por medio de radiación emitida por una partícula incandescente, conocida también como pavesa. De esta forma, la principal justificación es la posibilidad de controlar las variables que participan en el proceso de ignición.

Este estudio tiene como foco un área pocas veces explorada debido a su alta variabilidad intrínseca, por lo que es escasa la información que se puede encontrar en relación a procesos de ignición espontánea, aún más con el estrato vegetal utilizado. Se busca cualitativamente esclarecer el fenómeno que existe tras el

(a) Cono de pino y acículas.

(b) Estrato vegetal superficial formado por agujas de pino.

(c) Pino radiata (*Pinus Radiata*).

Figura 1.3: Pino radiata y sus componentes.

Tabla 1.1: Catastro de uso de suelos y recursos vegetacionales a Enero de 2016 (CONAF, 2016).

Región	Bosque nativo (ha)	Plantación forestal (ha)	Fracción de pino radiata sobre plantación forestal (%)	Mixto (ha)	Total (ha)
Arica y Parinacota	47,151	21	0	0	47,172
Tarapacá	73	26,975	0	0	34,275
Antofagasta	0	3,411	0	0	3,411
Atacama	0	0	0	0	0
Coquimbo	31,266	2,937	0	106	34,309
Valparaíso	484,116	68,758	19	725	553,598
Metropolitana	363,955	9,181	0	218	373,354
O'Higgins	459,309	130,536	60	546	590,391
Maule	384,714	607,594	89	19,519	1,011,827
Biobío	768,552	1,227,788	67	56,642	2,052,982
La Araucanía	964,153	632,289	53	4,764	1,644,081
Los Ríos	908,531	208,775	56	17,866	1,135,172
Los Lagos	2,827,436	96,599	23	12,799	2,936,835
Aysén	4,398,745	32,017	0	1,083	4,431,845
Magallanes	2,671,594	23	0	0	2,671,617
Total	14,316,822	3,046,904		157,143	17,520,869

proceso de ignición espontánea, estableciendo las correlaciones entre las principales variables en este estudio, tiempo de ignición y flujo de radiación.

Es necesario mencionar que el alcance de este estudio queda limitado a las condiciones establecidas de porosidad, flujo de radiación incidente y configuración geométrica del experimento y tipo de estrato determinados, quedando fuera de todo tipo de análisis el contenido de humedad de la biomasa, variaciones físicas del heater, otras variedades de estrato vegetal o el proceso químico asociado a la ocurrencia de la ignición y posterior combustión.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Estudiar de forma experimental los tiempos de ignición espontánea de un lecho poroso compuesto por acículas de *Pinus Radiata* mediante la exposición a una fuente de calor externa variando las propiedades físicas del estrato y los niveles de radiación incidentes.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Generar una base teórica adecuada a partir de investigaciones de similares características para comprender el funcionamiento del arreglo experimental.
2. Caracterizar la radiación emitida por la fuente de calor y la radiación incidente en el estrato vegetal en función de la cantidad de voltios suministrados al sistema.

3. Recolectar las agujas de pino necesarias para la realización de todos los ensayos experimentales, procurando que el lugar geográfico del cual sean extraídas sea siempre el mismo.
4. Caracterizar las propiedades físicas del estrato vegetal teniendo en cuenta su densidad de masa, densidad aparente, relación superficie-volumen y porosidad.
5. Diseñar una metodología para la disposición de acícula de pino en el portamuestras que permita minimizar la variabilidad de los tiempos de ignición de cada uno de los experimentos a realizar.
6. Diseñar una metodología experimental que permita minimizar la variabilidad de los tiempos de ignición de cada uno de los experimentos a realizar.
7. Realizar de forma metódica las mediciones que sean necesarias para obtener los tiempos de ignición, temperaturas radiales y pérdidas de masa en función del flujo radiativo incidente y las cartacerísticas físicas del estrato.
8. Determinar los niveles críticos de radiación incidente para las distintas porosidades establecidas.
9. Establecer una relación empírica entre los tiempos de ignición previamente obtenidos y el nivel de radiación incidente para cada una de las porosidades a trabajar.

2 | Marco Teórico

2.1. Transferencia de Calor

2.1.1. Descripción General

El calor es la energía que puede ser transferida de un sistema a otro producto de una diferencia de temperaturas (Eckert y Drake Jr, 1959). Siempre que exista una diferencia de temperatura en un cuerpo o entre cuerpos, existirá también transferencia de calor, ya sea por conducción, convección o radiación (Incropera y DeWitt, 1999). La transferencia se produce desde el cuerpo o sección más caliente al más frío, sin excepción, tomando lugar en todas las sustancias de la naturaleza, líquidos, gases y sólidos (Eckert y Drake Jr, 1959).

Para el caso de los sólidos, la transferencia de calor se da únicamente por medio de la conducción, en cambio, en gases y líquidos simultáneamente ocurren los procesos de conducción, convección y radiación (Eckert y Drake Jr, 1959).

2.1.2. Conducción

La transferencia de calor mediante el proceso de conducción puede ser entendido como el resultado directo de una transferencia de movimiento de una molécula con mayor energía a otra menos enérgica por las áreas de contacto (Eckert y Drake Jr, 1959), con esto, la energía calórica es transmitida como vibraciones o movimiento.

La conducción en sólidos se produce por las vibraciones de los átomos de una retícula en el caso de que sea dieléctrico, o a través de los electrones libres para materiales metálicos. En gases, múltiples colisiones aleatorias son producidas por la distancia que existe entre moléculas, comportamiento que puede ser explicado por la teoría cinética de los gases. Sustancias líquidas tienen comportamiento similares a sólidos y gases (Eckert y Drake Jr, 1959).

La formulación matemática de la Ley Fourier de Conducción de Calor se puede expresar como

$$\dot{q}_{cond} = -kA\frac{\partial T}{\partial n} \tag{2.1}$$

donde el factor de proporcionalidad k representa la conductividad térmica propia del material por donde pasa el flujo de calor, A es el área transversal normal a la transferencia de calor y $\partial T/\partial n$ corresponde al gradiente de temperatura del material.

En la Ec. 2.1, k no es necesariamente una constante, de hecho es una función de la temperatura en los tres estados, además de depender de la presión en líquidos y gases. Para simplificar el análisis, es frecuente obtener un valor medio de k.

2.1.3. Convección

Convección es el mecanismo de transferencia de calor que ocurre en fluidos, líquidos o gaseosos, con un sólido producto de una combinación entre el fenómeno de conducción y el transporte del fluido y energía, debido al propio movimiento del fluido. En otras palabras, el mecanismo de transferencia de calor sigue siendo la conducción, pero en este caso la energía puede ser transportada de un lugar a otro del espacio por el movimiento mismo del fluido (Çengel y Ghajar, 2011).

El movimiento del fluido puede generarse por un mecanismo externo, e.g., una bomba o un ventilador, denominándose convección forzada. Si producto de las fuerzas de empuje causadas por diferencias de densidad debido a diferencias de temperatura en la masa del fluido se genera el movimiento, recibe el nombre de convección natural (Çengel y Ghajar, 2011). Al existir conducción en un fluido, la convección natural también existirá como resultado de la diferencia de densidades del fluido.

Todas las complejidades del enfoque analítico del proceso pueden ser agrupadas en un único parámetro, como se muestra en la Ley de Enfriamiento de Newton

$$\dot{q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \tag{2.2}$$

La h en la Ec. 2.2 es conocida como el coeficiente de transferencia de calor o coeficiente de transmisión superficial. Es una unidad de conductancia y no una propiedad del material. Necesariamente se encuentra relacionado a la composición del fluido y a la naturaleza y geometría del movimiento del fluido sobre la superficie.

2.1.4. Radiación

Un cuerpo puede absorber o liberar energía térmica sin necesidad de un medio físico para ser transportado. Radiación térmica es la forma en que se conoce la emisión electromagnética que produce las alteraciones energéticas mencionadas, esta radiación es emitida en todas direcciones y cuando se encuentra con otro cuerpo, puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Es la forma de transferencia de calor más rápida y no se ve atenuada en el vacío (Çengel y Ghajar, 2011).

Todos los cuerpo, independiente del estado físico en el que se encuentren, emiten energía en forma de radiación, siempre y cuando su temperatura se encuentre por sobre el cero absoluto, también todos son capaces de absorber dicha energía.

Un modelo idealizado para el estudio de la radiación es mediante un cuerpo negro, i.e., un objeto capaz de absorber toda la luz y energía incidente sobre él y a su vez es un emisor perfecto de radiación, lo hace de forma uniforme en todas direcciones. De esta forma es posible determinar la tasa de radiación

máxima que un cuerpo es capaz de emitir por unidad de área gracias a la Ley de Stefan-Boltzmann

$$\dot{q}_{r,bb} = \sigma A_s T_s^4 \tag{2.3}$$

σ representa la constante de Stefan-Boltzmann, A_s es la superficie del cuerpo que emite radiación y T_s la temperatura del cuerpo. Todo objeto emite radiación a una razón menor que la de un cuerpo negro dada una misma temperatura y superficie, siendo expresada por

$$\dot{q}_r = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \tag{2.4}$$

donde ε es la emisividad de la superficie, cuyo valor oscila entre 0 y 1. Es un indicador de cuán próximo se encuentra de ser un cuerpo negro.

Para este estudio es necesario comprender el factor de forma, el cual consiste en la fracción de la radiación que sale de la superficie i y choca directamente con la superficie j, $F_{i\to j}$. Existe una relación de reciprocidad entre los productos de área y factor de forma de ambos cuerpos, $A_i F_{i\to j} = A_j F_{j\to i}$, además la suma de todos los factores de un cuerpo con el resto debe ser uno, $\sum_{j=1}^{N} F_{i\to j} = 1$ (Incropera y DeWitt, 1999). Al relacionarlo con la Ec. 2.3 se obtiene

$$\dot{q}_{i\to j} = A_i F_{i\to j} \sigma \left(T_1^4 - T_2^4\right) \tag{2.5}$$

2.2. Teoría de la Ignición de Sólidos

2.2.1. Descripción General

La mayor parte de los combustibles de un incendio son materiales sólidos, los cuales poseen gran cantidad de peligros inminentes a considerar, como el potencial de autoignición, propensidad al smoldering, facilidad de ignición y el ratio de propagación de la llama y liberación de calor una vez encendido. El estudio de este tipo de material es particularmente complejo, debido a que depende de muchos factores, como la forma, orientación, propiedades químicas y condiciones del entorno (Mowrer, 2004).

Cuando un combustible sólido a temperatura ambiente está expuesto a una fuente externa de calor, aumenta la temperatura de la cara expuesta, momento definido como el comienzo del proceso de ignición el cual involucra cambios tanto químicos como físicos. Las temperaturas más altas se alcanzan en la superficie, pero la transferencia de energía hacia el interior genera un aumento de temperatura en la mayor parte del sólido (Torero, 2016).

Para que un sólido pueda arder, debe producirse una gasificación, la cual generalmente involucra una descomposición térmica de moléculas complejas, conocido también como pirólisis. Estos gases combustibles deben ser liberados lo suficientemente rápido para generar una mezcla inflamable con el aire, teniendo en cuenta las pérdidas por las corrientes convectivas o alguna fuerza externa (Mowrer, 2004).

Si la combustión se da inicio debido a una fuente de ignición en la mezcla de gases, se le denomina ignición piloteada. En caso de no existir alguna fuente, se puede llevar cabo de todas formas una vez que los gases alcanzan la temperatura necesaria.

2.2.2. Generación de Gases de Pirólisis

Una vez que la superficie de un sólido alcanza su temperatura de ignición, la superficie comienza a pirolizar y arder, debido a un flujo de calor incidente $\dot{q}''_{inc}$ (Mowrer, 2004). La pirólisis suele ser un proceso endotérmico controlado por muchas reacciones químicas que dependen fuertemente de la temperatura. Como bien se mencionó, este proceso descompone las moléculas del combustible generalmente en moléculas más pequeñas (Torero, 2016) liberando gases combustibles. La velocidad con la que se produce dicha descomposición puede ser idealizada por una ecuación de Arrhenius (Quintiere, 2006; Fernandez-Pello, 2011; Torero, 2016)

$$\dot{m}'''_{fuel} = A Y^m_{O_2} Y^n_{fuel} e^{-E_s/(RT)} \tag{2.6}$$

donde A es una constante pre-exponencial y E es la energía de activación, ambas propias de cada reacción química, Y_{O_2} e Y_{fuel} representan de forma genérica la fracción de masa del oxígeno y combustible sólido que participan en la degradación, R es la constante universal de los gases y m y n también son constantes.

La generación de gases de pirólisis es fuertemente dependiente de la temperatura, mientras ésta se incrementa, la tasa de generación de gases también lo hace, no solo a nivel superficial gracias a la transferencia interna de calor. Entonces el flujo gaseoso generado es función de x, desde la superficie del sólido hasta la profundidad a la cual se aprecia un alza de temperatura, δ. Por lo tanto, el flujo másico de gases de pirólisis viene dado por

$$\dot{m}''_{fuel} = \int_0^{\delta} A Y^m_{O_2} Y^n_{fuel} e^{-E_s/(RT)} dx \tag{2.7}$$

2.2.3. Difusión de Gases de Pirólisis y Aire Ambiente

Después de comenzado el proceso de pirólisis, los gases comienzan a emerger de la superficie del sólido desplazados por una corriente convectiva o posiblemente por fuerzas externas,e.g., vientos en incendios forestales. Dentro de los gases producidos también se encuentran componentes totalmente oxidados como dióxido de carbono (CO_2), parcialmente oxidados como monóxido de carbono (CO) y moléculas con distintos niveles de oxidación. Es necesario tener en cuenta la presencia de estos gases inertes para cualquier análisis(Torero, 2016).

Las fuerzas mencionadas mezclan los gases combustibles con el aire ambiente, donde en la superficie la concentración de gases de pirólisis es muy alta con respecto a la de aire, situación que se revierte a medida que aumenta la distancia desde el sólido al punto de análisis, naturalmente los gases pirólisis y aire se desplazarán donde hayan menores concentraciones de los mismos.

La tasa de generación de gases de pirólisis aumenta cuando la temperatura lo hace, hasta eventualmente alcanzar una mezcla inflamable al combinarse con el aire en las proporciones adecuadas. Una mezcla inflamable se define como la concentración encontrada entre el Límite de Inflamabilidad Inferior (LFL por sus siglas en inglés) y el Límite de Inflamabilidad Superior (UFL) (Torero, 2016). Bajo el límite inferior la concentración de gases combustibles es muy baja y por sobre el límite superior la concentración es muy alta para lograr la ignición (Fernandez-Pello, 2011).

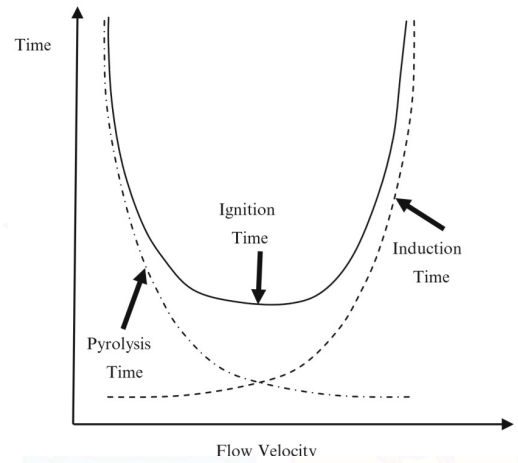


Figura 2.1: Esquema de los tiempos característicos involucrados en la ignición de una placa plana (Torero, 2016).

2.2.4. Tipos de Ignición

2.2.4.1. Piloteada

Representa una simplificación experimental práctica debido a que en la mayoría de los posibles escenarios de ignición hay una sección que se encuentra a gran temperatura. La presencia de un piloto, e.g. una chispa, arco eléctrico, etc., simplifica el proceso de gasificación y reduce la influencia de factores ambientales. En este caso, se puede considerar la ignición como el momento en el que el LFL se alcanza donde se encuentra el piloto (Torero, 2016).

Una vez que se produzca la ignición, la presencia de una llama sostenida dependerá de la tasa de producción de gases de pirólisis, si ésta no es suficiente la llama se extinguirá hasta que nuevamente se alcance una mezcla inflamable, dando origen a una serie de destellos. El instante al cual se produce este suceso se denomina flash point (Torero, 2016).

Con el aumento de la temperatura aumenta la velocidad con la cual se generan gases combustibles, el momento en el que sea lo suficientemente rápida y mantenga la combustión luego de la ignición se denomina fire point (Torero, 2016).

2.2.4.2. Espontánea

Una vez alcanzada la mezcla propicia, debe alcanzar la temperatura necesaria a la cual la reacción de combustión puede ocurrir. En el caso de la combustión espontánea o llamada también auto-ignición, no existe un punto caliente que actúe como piloto para la reacción, por lo que la mezcla debe absorber la suficiente cantidad de energía hasta alcanzar la temperatura de ignición (Mowrer, 2004)

Niioka et al. (1981) describe el proceso como un conjunto de dos partes. Una de ellas representada por el tiempo de pirólisis, el cual corresponde al tiempo requerido hasta alcanzar una mezcla inflamable, y la otra representada por el tiempo de inducción, tiempo necesario para que alcance una temperatura donde la ignición pueda ocurrir, como se ve en la Fig. 2.1.

La cantidad exacta de energía puede asociarse a un número de Damköhler, correspondiente a la razón entre el tiempo de residencia y el tiempo necesario para que la reacción química ocurra. Este tiempo de la reacción depende directamente de la temperatura de los reactantes, mientras mayor sea, mayores son los ratios y menores los tiempos de reacción química. El tiempo de residencia es una medida de tensión, cuánto tiempo permanecen los reactantes en un lugar específico, por lo que se relaciona directamente con la rapidez de los gases. Si el tiempo requerido por la reacción química es menor al de residencia, la reacción posee el tiempo suficiente para ocurrir y originar una llama. Entonces existe un número de Damköhler crítico a partir del cual la ignición puede ocurrir (Torero, 2016).

La auto-ignición es un proceso complejo que involucra interacciones entre fases gaseosas y sólidas, por lo que es necesario establecer condiciones experimentales claras y simplificaciones del análisis (Torero, 2016).

2.2.5. Aproximación Thermally Thin y Thermally Thick

Luego de que las ondas térmicas alcanzan el final de la muestra es necesario cuantificar las pérdidas de calor en el extremo posterior. El grosor de la muestra d se convierte en un factor relevante del problema. Para una muestra thermally thin, el gradiente de temperatura dentro del sólido es despreciable durante la mayor parte del proceso de ignición, cuando el gradiente de temperatura dentro del sólido es significativo durante el periodo de ignición el material es thermally thick (Torero, 2016).

Para discriminar sobre cuál aproximación es la correcta, es posible aplicar un criterio basado en el número de Biot (Bi) (Quintiere, 2006; Torero, 2016)

$$Bi \equiv \frac{dh_c}{k} \ll \frac{h_c\,(T_s - T_0)}{\dot{q}''} \tag{2.8}$$

donde h_c es el coeficiente global de transferencia de calor y k es la constante de conductividad térmica. Si se cumple la Ec. 2.8, el combustible es un sólido que puede ser representado por una aproximación thermally thin.

La teoría clásica está desarrollada para sólidos opacos, por lo que no es una muy buena aproximación afirmar que las agujas de pino formen un medio thin o thick, pero es posible considerar el conjunto de agujas de la muestra como un sólido, determinando si existe un gradiente o no de temperatura en el estrato. Además, no es posible encontrar teoría enfocada en medios porosos, salvo la investigación realizada por Hernández et al. (2017) en la cual se basa este estudio.

2.2.6. Consideraciones

2.2.6.1. Charring

Durante el proceso de combustión, hay superficies en las que se forma una capa de carbón que podría seguir descomponiéndose completamente hasta formar cenizas inertes o continuar con un proceso de carbonización o charring secundario, repitiéndose hasta completar la descomposición. Materiales non-charring se descomponen sin dejar residuos (Torero, 2016).

Para materiales que producen charring, una oxidación superficial puede ser producida antes de la ignición, durante la fase de gasificación, situación común en combustión espontánea o ante bajos flujos radiativos. La temperatura superficial aumentará a medida que la capa de carbón crezca y aísle el material (Quintiere, 2006), generando impacto en la transferencia de masa y calor (Torero, 2016).

La principal diferencia entre los tipos de material que producen carbón en la superficie y los que no radica en la temperatura alcanzada tanto por las características aislantes mencionadas y la re-radiación desde esta capa (Mowrer, 2004).

2.2.6.2. Flujo Crítico de Ignición

El flujo crítico de ignición de un material sólido, $\dot{q}''_{inc,cri}$, es el mínimo flujo externo de calor que provocará la gasificación suficiente en la superficie del material para permitir su ignición (Mowrer, 2004). Se pueden evaluar flujos críticos tanto para igniciones piloteadas como espontáneas, siendo mayores los flujos radiativos necesarios para la auto-ignición.

Muy poca información se encuentra disponible sobre ignición no piloteada, pero para el caso de la madera, el flujo crítico de ignición suele ser dos a tres veces más alto que con la aplicación de un piloto (Mowrer, 2004).

Desde un punto de vista práctico, Mowrer (2004) habla de evaluar el potencial de ignición a un flujo externo particular por un período determinado de tiempo dependiendo del experimento, pudiendo no representar el mínimo absoluto al ser una aproximación a éste. Treinta minutos fueron los establecidos en este estudio para determinar dicho flujo.

2.2.6.3. Temperatura de Ignición y Tiempo de Ignición

Si se asume que el sólido es un material inerte hasta que se produzca la ignición y la fase gaseosa se resume en un coeficiente de transferencia de calor total h_T es equivalente a afirmar que la ignición ocurrirá al comienzo de la pirólisis y que este proceso se puede caracterizar simplemente por medio de una temperatura superficial característica, T_{ig}. El tiempo que tarda desde que la muestra es expuesta a un flujo externo de calor y la ignición se denomina tiempo de ignición, t_{ig} (Torero, 2016). Con ambos parámetros es posible representar todo el proceso de ignición.

Torero (2016) establece una relación entre el tiempo de ignición y el flujo crítico de ignición. Si el tiempo de ignición es infinitamente largo, no existirá un gradiente de temperatura dentro del sólido y las pérdidas de calor serán equivalentes al calor incidente. Esto representa el mínimo flujo de calor requerido para alcanzar la temperatura de ignición.

(a) Propagación por Subsuelo. Fotografía de Tina Fuentes (Valparaíso, 2017). Departamento Audiovisual Bomberos Valparaíso.

(b) Propagación Superficial. Fotografía de Álvaro Rojas (Valparaíso, 2016). Asociación de Fotógrafos Independientes de Valparaíso.

(c) Propagación por Copas. Fotografía de Ramón Sernuda (Valparaíso, 2016). Departamento Audiovisual Bomberos Valparaíso.

(d) Propagación por Spotting. Fotografía de Álvaro Rojas (Valparaíso, 2015). Asociación de Fotógrafos Independientes de Valparaíso.

Figura 2.2: Mecanismos de Propagación: Casos Reales.

2.3. Física del Fuego: Incendios Forestales

2.3.1. Descripción General

La velocidad de descomposición de la biomasa propia de un sector forestal o de similares características es menor a la velocidad de producción, entonces los desechos comienzan a acumularse, siendo el principal combustible en un eventual incendio (Sugihara, 2006). Teniendo la suficiente cantidad de combustible, una fuente de ignición y las condiciones climatológicas propicias, un incendio forestal es inminente.

La combustión es un tipo de proceso de oxidación, los cuales combinan hidrocarburos y oxígeno para liberar dióxido de carbono, agua y energía. La combustión es una reacción en cadena veloz que ocurre a altas temperaturas (Sugihara, 2006).

Fons (1946) realizó el primer acercamiento matemático para modelar el fenómeno de propagación, donde la dispersión del fuego es una serie de igniciones del combustible adyacente determinadas por el tiempo de ignición y la distancia entre partículas de combustible. Dicho de otra manera, un lecho de combustible sería un conjunto de unidades de volumen de combustible, las cuales se encienden debido a que una unidad adyacente produce suficiente calor para causar su ignición.

La unidad de combustible que arde es una fuente de calor para las unidades próximas, las cuales actúan como disipadores de calor. La razón de propagación está determinada por la razón a la cual las unidades de combustibles adyacente son encendidas (Frandsen, 1971).

Dependiendo de las características de la biomasa, potencial combustible, es que se puede clasificar el tipo de propagación. A continuación se enumeran los tipos de combustible propios de un entorno forestal.

1. Combustible bajo el suelo (ground fuel).
2. Combustible a nivel del suelo (surface fuel).
3. Combustible en las copas de los árboles (crown fuel).
4. Combustible en forma de pavesas (firebrands).

En la Tabla 2.1 se muestra una clasificación clásica de incendios forestales dadas las características del tipo de combustible que componen el entorno afectado por el fuego. Además, en la Fig. 5.1 se muestran imágenes reales de distintos incendios forestales e interfaz ocurridos en la Región de Valparaíso.

Tabla 2.1: Tipos de incendios forestales según el tipo de combustible (Sugihara, 2006)

Tipo de Incendio	Estrato Combustible	Descripción del Combustible
Subsuelo	Combustible bajo suelo	Material orgánico (Duff), turba, acumulación basal, descomposición animal
Superficie	Combustible de lecho vegetal	Lecho vegetal, líquenes, musgo
	Combustible de madera	Madera, madera podrida, árboles caídos, tocones
Copa Pasivo	Arbustos	Arbustos, acícula aún en el árbol
	Vegetación baja	Pasto, maleza, hierbas
	Combustible de lecho vegetal	Lecho vegetal, líquenes, musgo
	Combustible de madera	Madera, madera podrida, árboles caídos, tocones
Copa Activo	Arbustos	Arbustos, acícula aún en el árbol
	Vegetación baja	Pasto, maleza, hierbas
	Canopia de árboles	Canopias, troncos, ramas
	Combustible de lecho vegetal	Lecho vegetal, líquenes, musgo
	Combustible de madera	Madera, madera podrida, árboles caídos, tocones
Copa Independiente	Arbustos	Arbustos, acícula aún en el árbol
	Vegetación baja	Pasto, maleza, hierbas
	Canopia de árboles	Canopias, troncos, ramas

2.3.2. Condiciones Necesarias

Como ya se mencionó, existen tres factores indispensables para que se inicie y posteriormente se sustente cualquier tipo de incendio: calor, oxígeno y combustible, denominados también como el triángulo del fuego. Es necesario generar el calor suficiente para que el combustible libere gases de pirólisis y además alcanzar la temperatura de ignición, combinándose con una cantidad justa de oxígeno que sustente la reacción.

Eliminando cualquiera de estos tres factores, la combustión no puede llevarse a cabo. Hay algunos autores que consideran un cuarto factor, reacción en cadena, denominando a esta combinación como el tetraedro del fuego, como lo hacen en Safelincs Ltd (2016). En base a esta teoría es que se sustentan todas las técnicas de combate de incendios.

Siguiendo esta línea, la intensidad de un incendio forestal dependerá de cuatro factores claves, combustible, topografía, tipo de clima y la variabilidad del tiempo año a año (Cary et al., 2006).

2.3.3. Mecanismos de Propagación

2.3.3.1. Subsuelo

El fuego quema raícies, la capa de humus del suelo y la micro-fauna del bosque, sin arder de forma visible sobre la superficie. La tasa de propagación es lenta debido a la carencia de oxígeno. Este tipo de incendios generalmente es posible apreciarlos durante la fase de liquidación, al ser emanado humo del suelo vegetal sin una combustión visible como se ve en la Fig. 2.2a, avanzan lentamente por debajo de la superficie destruyendo los sistemas subterráneos de la vegetación y brotando en algunos puntos pudiendo iniciar un nuevo foco superficial.

Debido a la esencia de este tipo de propagación, el combate del mismo es extremadamente complicado, como se pudo apreciar en el incendio de la Reserva China Muerta en la Región de la Araucanía el año 2015 (CONAF, 2015), donde se vieron afectadas más de 6,500 ha de bosque nativo.

2.3.3.2. Superficial

Los incendios de superficie queman principalmente el sotobosque, material en descomposición, madera y corteza a baja altura, con un frente de fuego activa. Es el mecanismo de propagación más común y su velocidad dependerá de los factores previamente mencionados que influyen en la intensidad del fuego. Este fenómeno puede ser claramente visualizado en la Fig. 2.2b.

2.3.3.3. Por Copas

Es un fuego de superficie el que se propaga de manera vertical hasta las canopias de los árboles como se puede apreciar en la Fig. 2.2c. Suelen ser incendios violentos, condicionados principalmente por el combustible y su disposición en el árbol. Se pueden clasificar en tres fases según Wagner (1977).

La primera se denomina incendio copas pasivo, donde un número reducido de árboles arden producto de la carga calórica liberada por la combustión del sotobosque de forma intermitente. Las llamas alcanzan las copas de los árboles una vez alcanzada la temperatura de ignición de las mismas. Si bien posiblemente se produce una débil propagación entre copas, pavesas pueden desprenderse generando nuevos focos. Es común en bosques con una densa vegetación de baja altura y árboles dispersos.

Si la energía proporcionada por el fuego superficial y el de copas es suficiente para sostener la propagación en las canopias arbóreas, se trata de un incendio de copas activo. Fuertes vientos, mayor densidad

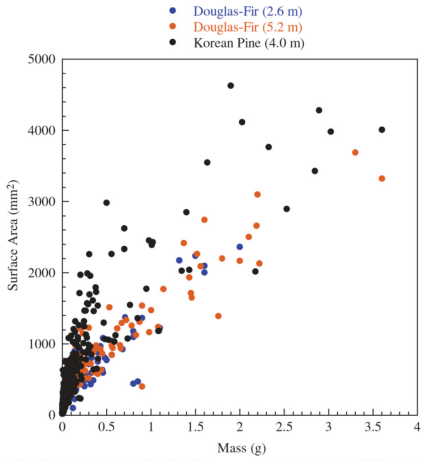


Figura 2.3: Superficie calculada en función de la masa de las pavesas (Manzello et al., 2009).

del combustible en la copa y una menor distancia entre copas son condiciones que favorecen este tipo de propagación.

La tercera categoría es llamada incendio de copas independiente, donde el frente avanza por las copas de los árboles sin depender de la combustión. Principalmente se observa este fenómeno en bosques con gran densidad de copas. Se encuentra relacionada directamente con el mecanismo de spotting explicado a continuación, pudiendo encender coronas alejadas del incendio principal.

2.3.3.4. Spotting

En la Fig. 2.2d se ve el desplazamiento de pavesas gracias a una fotografía de larga exposición en un incendio de interfaz urbano-forestal ocurrido en la ciudad de Valparaíso, en Marzo de 2015.

Ramas y árboles encendidos durante cualquiera de las fases de incendios de copa son fuente de pavesas, partículas incandescentes con o sin presencia de llama desprendidas de un cuerpo en combustión, desplazadas por las fuertes corrientes de viento producidas bajo el alero del micro-clima de un incendio forestal hasta situarse en algún punto del terreno, pudiendo o no iniciar un nuevo foco.

Mientras las brasas están en vuelo, la velocidad y dirección del viento junto a la homogeneidad y cobertura vegetativa del terreno influyen en la trayectoria y distancia recorrida. Las brasas más grandes no se elevan tanto producto de la pluma convectiva y no viajan tan lejos como las brasas pequeñas, por lo tanto, son habitualmente las que originan nuevos focos activos cuando alcanzan algún cuerpo combustible (Sugihara, 2006).

Manzello et al. (2009) presentó las principales características físicas de pavesas originadas artificialmente a partir de Korean Pine y Douglas Fir, ver Fig. 2.3. Es esencial conocer algunas características de estas partículas, como su tamaño, forma, densidad y altura desde la cual se desprenden.

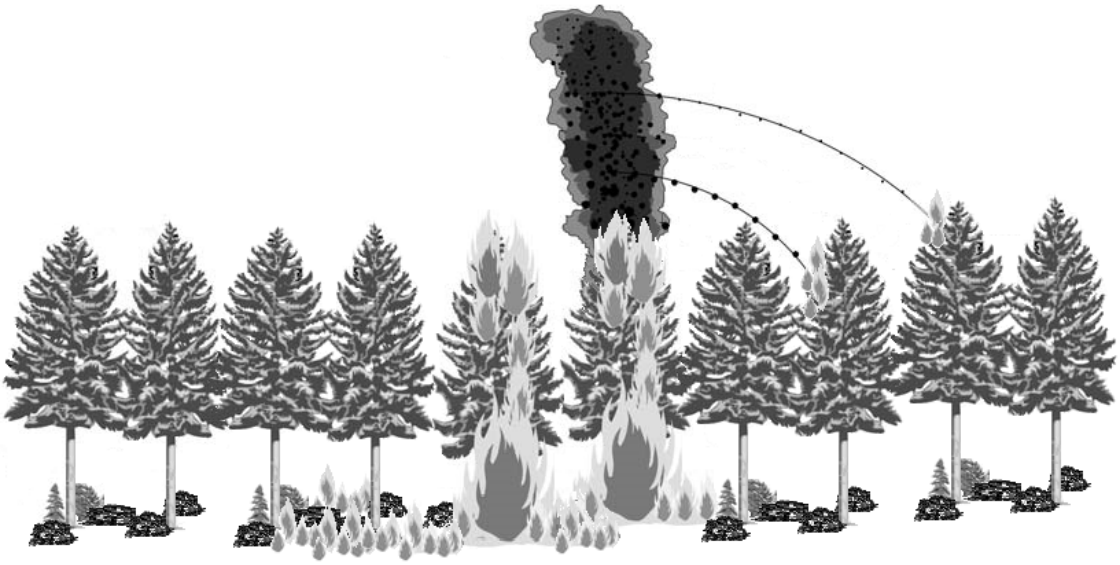


Figura 2.4: Descripción gráfica del proceso de propagación en un incendio forestal.

2.4. Biomasa

2.4.1. Densidad de Masa

Hace referencia a la densidad de masa del combustible, ρ_{fuel}, y se cuantifica como la masa del combustible o partícula del combustible sin humedad en su interior por unidad de volumen (Keane, 2015). Se calcula como

$$\rho_{fuel} = \frac{m_{fuel}}{v_{fuel}} \tag{2.9}$$

Para determinar el volumen de la partícula de combustible es posible realizar una aproximación asumiendo cierta semejanza a una forma geométrica estándar, estableciendo dimensiones promedio que permitan obtener un volumen referencial. Debido al gran error en el que se incurre producto del trabajo con partículas muy pequeñas (una aguja de pino), se describe una metodología más adecuada. Ésta consiste en sumergir la partícula en algún líquido y medir la diferencia de volumen provocada, teniendo en consideración que debe ser un líquido que no pueda ser absorbido por el pino en este caso o cubrir las partículas con alún tipo de cera. En ambos casos la partícula debe ser secada en un horno. Luego, con la masa de la partícula, se aplica la Ec. 2.9.

2.4.2. Densidad Aparente

La densidad aparente de un componente de combustible (bulk density en inglés), ρ_b, es la masa del material que compone el combustible por unidad de volumen del espacio en el que esta masa se encuentra. A diferencia de la densidad de masa, la densidad aparente incluye los espacios vacíos (o con aire) entre las

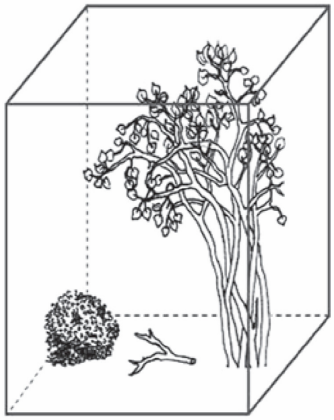


Figura 2.5: Ejemplo ilustrado de cálculo de densidad aparente (Keane, 2015).

partículas del combustible (Keane, 2015). Se obtiene a partir de la siguiente ecuación

$$\rho_b = \frac{m_{fuel}}{v_{basket}} \tag{2.10}$$

en la cual se desprecia la masa de aire presente en el volumen de control (v_{basket}). Comúnmente utilizado para representar el arreglo espacial del material combustible como se aprecia en la Fig. 2.5. Este concepto se puede aplicar a las canopias de los árboles para modelar incendios de copa o a vegetación de mediana y baja altura para modelar incendios de superficie.

2.4.3. Packing Ratio y Porosidad

Rothermel et al. (1972) cuantifica la compacidad del combustible como el packing ratio, definido como la fracción de volumen ocupado por el combustible en el volumen de control, fácilmente calculado como la razón entre la densidad aparente y la densidad de la partícula de combustible.

$$\beta = \frac{\rho_b}{\rho_{fuel}} \tag{2.11}$$

La falta de compacidad de un combustible provoca una menor transferencia de calor en lechos sueltos, mientras que en los lechos densos la baja relación entre aire y combustible sumado a la baja penetración de calor dan como resultado menores tasas de dispersión e intensidad (Keane, 2015). Eventualmente es posible encontrar un rango óptimo de compactación del combustible, donde se tenga el balance buscado entre aire, combustible y transferencia de calor.

Otra forma de cuantificar la compacidad es por medio de la porosidad, ϵ, ratio entre el volumen ocupado por aire o vacío y el volumen total del estrato (Keane, 2015).

$$\epsilon = \frac{v_{aire}}{v_{basket}} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_{fuel}} \tag{2.12}$$

Similar a la definición de porosidad, se encuentra la fracción en volumen del material combustible,

α_{fuel}, que representa la razón entre el volumen del combustible y el volumen total del estrato.

$$\alpha_{fuel} = \frac{v_{fuel}}{v_{basket}} \tag{2.13}$$

Notar que si se desprecia la masa de aire, se tiene que $\alpha_{fuel} = \beta$, entonces $\epsilon = 1 - \alpha_{fuel}$.

2.4.4. Relación Superficie-Volumen

La relación superficie-volumen, ω, se define como el área de una partícula combustible dividida por el volumen de la misma. Partículas gruesas poseen valores bajos de este ratio ($\omega < 1$ m^{-1}), mientras que las más delgadas, como una aguja de pino, tienen valores altos ($\omega > 2000$ m^{-1}). La geometría de la partícula es caracterizada indirectamente por la relación explicada y así representa indirectamente el efecto del tamaño del combustible en los procesos de combustión, siendo un indicador de la tasa de respuesta de las partículas combustibles a fluctuaciones de temperatura y humedad (Keane, 2015).

La mayoría de las partículas de combustible poseen una geometría compleja, dificultando en extremo la medición de la relación superficie-volumen. Cualquier técnica que se pueda aplicar se ve afectada por el cambio constante de las partículas en respuesta a procesos biofísicos endógenos y exógenos. Están sujetas a fluctuaciones en el contenido de humedad, temperatura y humedad relativa, fijando un dinamismo en la partícula misma, lo que se traduce en una mayor variabilidad en la estimación del ratio de cada partícula (Keane, 2015).

2.5. Análisis Estadístico

En primer lugar es necesario establecer un tamaño de muestra que permita alcanzar bajos niveles de error experimental, teniendo en cuenta que este análisis no busca ser exhaustivo, es necesario realizar ciertas aproximaciones con las cuales es posible obtener un tamaño de muestra estimado, el cual queda condicionado a factores externos, siendo el tiempo disponible para la elaboración la totalidad de los experimentos el factor crítico.

Hay algunos supuestos a tener en consideración (Walpole et al., 2016)

1. El tamaño de la población (N) es muy grande ($N \sim \infty$).
2. La población distribuye cuasi-normal.
3. La desviación estándar de la población es desconocida, pero puede ser estimada por la desviación estándar de la muestra.

Dados estos supuestos, el tamaño de muestra n está dado por (Walpole et al., 2016)

$$n = \left(\frac{t_{n-1,1-\alpha/2}\, s}{e} \right)^2 \tag{2.14}$$

donde t_{n-1} corresponde a la inversa de la distribución t-Student con (n-1) grados de libertad, $(1-\alpha)100\,\%$ el nivel de confianza, s la desviación estándar de la muestra y e el error máximo que se busca alcanzar.

Entonces, de la Ec. 2.14, dado α y s, se puede estar $(1-\alpha)100\,\%$ seguros de que el error no superará la cantidad especificada e cuando el tamaño de muestra sea n (Walpole et al., 2016). Es necesario notar que n se encuentra a ambos lados de la igualdad.

Una de las situaciones que surge a continuación es el cálculo de la desviación estándar muestral. Se estableció realizar cinco mediciones por cada set de muestras para calcular s y determinar así el tamaño muestral adecuado que se tendrá como referencia.

En segundo lugar, es necesario realizar un análisis luego de la adquisición de datos, se verifica la presencia de datos atípicos que puedan estar alterando las mediciones. El test de Grubbs es el utilizado en este estudio para la detección de outliers, el cual es detallado a continuación (Grubbs, 1969).

Sean las hipótesis

H_0 : *No hay datos atípicos en la muestra.*

H_a : *Hay datos atípicos en la muestra.*

El test de Grubbs se define como

$$G = \frac{max|x_i - \overline{x}|}{s} \tag{2.15}$$

La hipótesis de que no hay datos atípicos se rechaza si

$$G > \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{(t_{\alpha/2n,n-2})^2}{n-2+(t_{\alpha/2n,n-2})^2}} \tag{2.16}$$

donde $t_{\alpha/2n}$ denota el valor crítico de la distribución t-Student con $(n-2)$ grados de libertad y una significancia de $\alpha/2n$.

Es necesario tener en cuenta que las Ec. 2.15 y 2.16 sirven para detectar un dato atípico a la vez, por lo que si se encuentra algún outlier, el test debe repetirse luego de que éste sea eliminado.

EX UMBRA
IN
SOLEM

3 | Diseño Experimental

3.1. Variables Respuesta

Este estudio tiene como objetivo la medición de distintas variables que deben tenerse en consideración en un proceso de ignición y posterior combustión. Con el uso de éstas es que se podrán establecer relaciones entre ellas que permitan modelar el fenómeno idealizado de ignición de un nuevo foco durante un incendio forestal provocado por una pavesa de manera empírica, con el fin de comparar los resultados con un modelo analítico del mismo. Es por esto que el aparato experimental se enfoca en favorecer la obtención de las mediciones de cada una de las variables en consideración, para así disminuir la variabilidad de los experimentos.

A continuación se mencionan dichas variables:

1. Tiempos de ignición, t_{ig}.
2. Temperatura radial del estrato en función del tiempo, $TC_j(t)$.
3. Pérdida de masa normalizada en función del tiempo, $\eta(t) = 1 - m(t)/m_0$.
4. Flujos radiativos incidentes en el estrato vegetal, $\dot{q}''_{inc}$.

3.2. Montaje Experimental

3.2.1. Descripción General

Idealized Firebrand Ignition Test, IFIT, consiste en una idealización de lo que ocurre con una pavesa durante un incendio forestal o de interfaz, la cual viaja por el aire hasta posicionarse en algún punto, pudiendo encender un estrato de biomasa y originar un nuevo foco lejos del frente del incendio.

La partícula incandescente es representada por medio de una resistencia eléctrica de nitruro de silicio cuya fuente de energía es la red eléctrica de 220 V nominales y elevada hasta 225 V por medio de un transformador trifásico y siendo regulada por transformador variable. Con ayuda de un motor lineal el heater es posicionado cuidadosamente en la sección anular del estrato vegetal del portamuestras o basket, disminuyendo la variabilidad producto del desplazamiento del mismo.

Masa y temperaturas radiales son medidas en tiempo real por una balanza analítica y cinco termocuplas respectivamente durante todo el proceso, desde que se expone el estrato vegetal dispuesto en el basket pasando

por la ignición y hasta que ya no se observa combustión alguna o la pérdida de masa es despreciable. Los datos son enviados a un computador por medio de un sistema de adquisición de datos para luego ser analizados.

El arreglo experimental se encuentra rodeado por Plexiglas para evitar ruidos en las mediciones de pérdida de masa y temperaturas radiales producto de corrientes de aire, permitiendo el flujo necesario para que la combustión pueda existir.

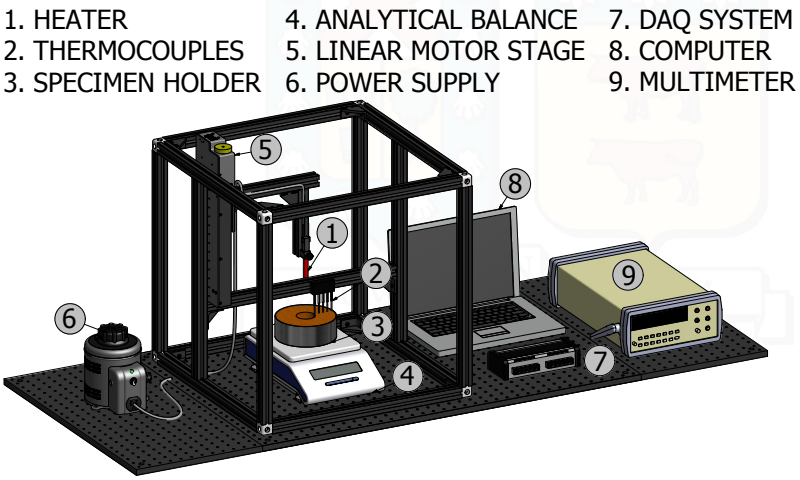


Figura 3.1: Vista general del montaje experimental IFIT.

3.2.2. Componentes del Montaje Experimental

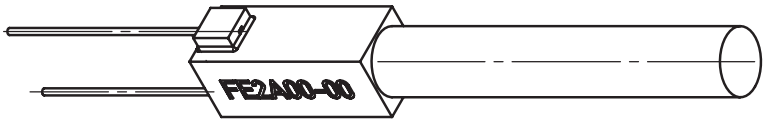
3.2.2.1. Heater

Propiedades Físicas y Radiativas

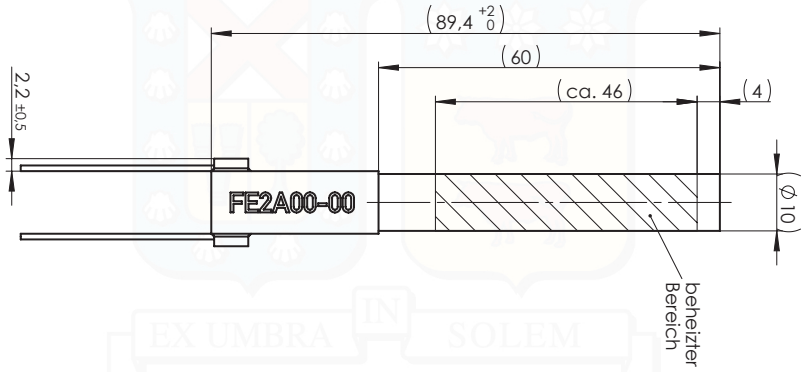
La elección de la fuente de calor correcta es uno de los aspectos más relevantes. Geometría y capacidad de emitir radiación son dos de las características fundamentales que deben ser analizadas. Manzello et al. (2006b,a, 2008, 2009) han realizado numerosos experimentos relacionados al proceso de spotting, determinando formas y dimensiones de las partículas incandescentes desprendidas de distintos tipos de combustible forestal. En estos estudios han mostrado que cilindros y discos son las formas geométricas más comunes, lo que concuerda con el origen de gran parte de las pavesas, ramas incandescentes de sección transversal circular. Estudios más recientes sobre la geometría de las pavesas muestran resultados algo diferentes. Filkov et al. (2017) realizaron su investigación recolectando pavesas en incendios controlados en bosques de pino, concluyendo que las formas mencionadas efectivamente se encuentran, pero son formas rectangulares provenientes de la corteza de los árboles son las más frecuentes.

En base a la distribución superficial de pavesas originadas en WUI, se dimensionó el heater de nitruro de silicio (Si_3N_4) manufacturado por Bach RC. Se optó por una fuente de radiación cilíndrica de radio r_h = 5 mm y largo de la zona caliente l = 46 mm, resultando en una superficie de 3,612 mm^2, ver Fig. 3.2b. El área del heater se encuentra dentro del rango mostrado en la Fig. 2.3.

La resistencia cerámica, como ya se mencionó, está hecha de nitruro de silicio (Si_3N_4) cuya emisividad



(a) Heater Bach RC de Si_3N_4



(b) Dimensiones del heater

Figura 3.2: Vista y dimensionamiento del heater (Bach RC).

es mayor a 0.9 según información reportada por Bach RC, apreciable en la Tabla 3.1 junto a las demás características de interés de este material. Las especificaciones técnicas del heater señalan una resistencia eléctrica base de 132 Ω ± 25 % medida a 20 °C y un rango máximo de voltaje suministrado de 230 V al cual se alcanza teóricamente la temperatura máxima segura. Se realizaron ensayos de laboratorio llevando el heater hasta el punto de quiebre, lo cual ocurrió a los 280 V. Notar que el voltaje máximo suministrado al heater durante los experimentos fue de 225 V, dentro del rango recomendado.

Tabla 3.1: Propiedades físicas y radiativas del Si_3N_4

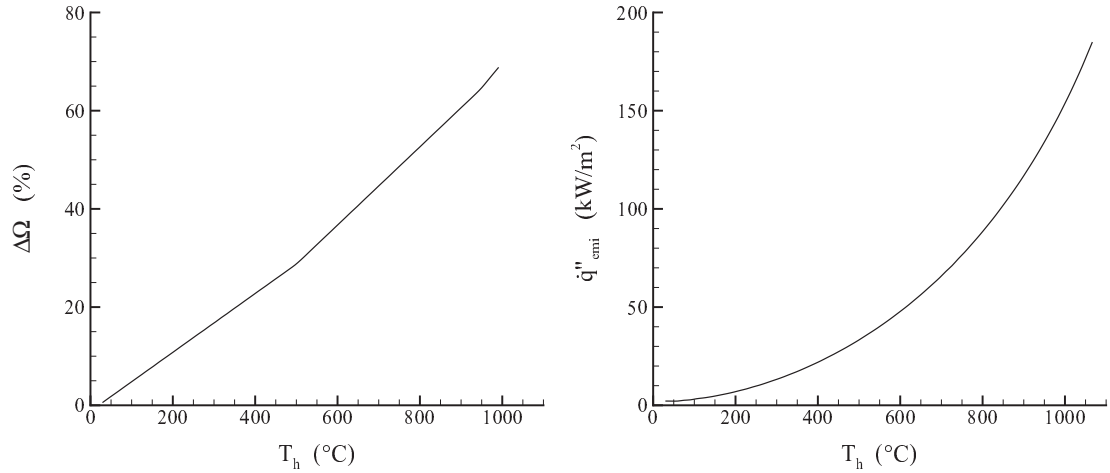
Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Temperatura máxima	T_max	°C	1000
Conductividad térmica	λ	W/mK	40
Temp. de shock para la resistencia	ΔT	K	500
Emisividad (a 1100 °C)	ε	-	0.96
Módulo de Young	E	GPa	320
Módulo de ruptura	δ_{BB}	MPa	400
Esfuerzo de compresión	δ_D	MPa	2000
Coeficiente de expansión térmica	α	$10^{-6}K^{-1}$	3
Densidad	ρ	kg/m^3	3210
Calor específico	c_p	J/kgK	750
Porosidad	100 - % t.D.	%	0
Módulo de Weibull	m	-	7.9

Con el heater de nitruro de silicio se alcanzan en este estudio temperaturas de hasta 1000 °C según el rango de operación segura recomendado de fábrica, en cambio, con las demás opciones del mercado como lo son heaters de acero o Alloy, ambos con aislante de óxido de magnesio, es posible llegar a temperaturas de 500 °C y 750 °C respectivamente.

Según la información proporcionada por Bach RC, empresa alemana fabricante de resistencias de Si_3N_4, el heater posee una emisividad ε de 0.96 a 1100 °C. Resistencias de acero y Alloy eventualmente tiende a explotar debido a su baja emisividad, ya que han sido diseñados para operar dentro de un fluido, removiéndose el calor por conducción o convección.

El Si_3N_4 posee un coeficiente de expansión cuatro veces menor al del acero y ocho veces menos al del Alloy. El heater se encuentra restringido espacialmente, por lo que una expansión considerable del mismo podría dañar el equipo utilizado e incluso a la persona que lo opere.

En la Fig. 3.3a se representa gráficamente el comportamiento de la resistencia eléctrica en función de la temperatura, pudiendo observar claramente un comportamiento no-óhmico. No representa ningún tipo de problema al momento de realizar el estudio. La Fig. 3.3b muestra la radiación emitida por el heater a distintas temperaturas, llegando hasta 150 kW/m^2 a una temperatura de 1000 °C, valores que se condicen con los valores obtenidos en el cálculo del flujo radiativo emitido por el heater, $\dot{q}''_{emi}$, a partir de los valores de radiación incidente en el estrato, $\dot{q}''_{emi}$, determinados en forma experimental y que se muestran en la Fig. 4.2.



(a) Heater Bach RC de nitruro de silicio **(b)** Dimensiones del heater

Figura 3.3: Información de la resistencia eléctrica y radiación emitida por el heater (Bach RC)

3.2.2.2. Otros Componentes

Termocuplas

Una termocupla es un instrumento compuesto por dos metales unidos en uno de los extremos. Según la temperatura a la que se encuentre expuesta la unión, se produce un voltaje del orden de los milivolts, estas variaciones de voltaje se relacionan de forma proporcional a las de temperatura.

Se utilizaron termocuplas tipo K de 1.5 m de longitud y 1 mm de diámetro, cuyos metales que las componen son cromel (aleación Ni-Cr) y alumel (aleación Ni-Al). Éstas operan en un rango de temperatura de -180 °C hasta 1370 °C.

Portamuestras

Se eligió un heater cilíndrico por motivos ya descritos anteriormente. Por este motivo, la disposición del estrato vegetal se eligió con tal de simplificar los cálculos de radiación incidente. Con un portamuestras de sección anular axisimétrico al heater el cálculo de factor de forma entre la superficie cilíndrica del heater, A_h, y la del estrato expuesto, A_i, es bastante más fácil.

Posee una altura igual a la altura l de la zona caliente del heater. Los radios interno r_i y externo r_o fueron elegidos con tal de que el espesor del estrato($r_o - r_i$) representara condiciones realistas, estableciendo un radio interno de 20 mm y radio externo de 65 mm. Para controlar el bending de las agujas de pino se incorporó una malla delgada lo suficientemente abierta para no interferir con la radiación incidente al estrato.

Es necesario tener en cuenta que la balanza posee una capacidad máxima de carga de 320 g, por lo que el material escogido debe ser de baja densidad y resistente a altas temperaturas, siendo acero inoxidable la alternativa a utilizar.

Balanza Analítica

Se utiliza una balanza analítica marca *Shimadzu* modelo *AUW-320* para medir la pérdida de masa producto de la liberación de gases de pirólisis de la muestra y su posterior combustión. Posee una precisión de hasta 0.1 mg y una frecuencia de adquisición de datos de 1 Hz. La variación de masa con respecto al tiempo es muy pequeña, por lo que la capacidad de la balanza de detectar cambios tan pequeños la hace ser el instrumento adecuado. La balanza transmite los datos a una planilla Excel o Bloc de Notas al estar conectada al computador mediante puerto RS232 y un adaptador RS232-USB.

Motor Lineal con Controlador Integrado

Para disminuir la variabilidad de las mediciones producto del movimiento del heater dentro y fuera del portamuestras, se utiliza un motor lineal *Thorlabs* modelo *LTS150*, el cual posee una presición en el eje de 5 μm, una capacidad de carga vertical de hasta 4 kg y una velocidad máxima de 50 mm/s, otorgando 150 mm de recorrido lineal. Este dispositivo puede ser controlado de forma remota a través de un computador o manualmente con el teclado de control del motor.

Fuente de Poder

Para poder variar el voltaje suministrado al sistema según los requerimientos de cada uno de los experimentos es necesario utilizar dos instrumentos, apreciando un pequeño cambio con respecto a la Fig. 3.1.

Transformador Variable: También denominado como *Variac*, donde el voltaje de entrada son 210 V provenientes de la red eléctrica y la salida se encuentra en un rango de 0 % a un 100 % del provisto. Elaborado por *Carroll & Meynell*, modelo *4A-CMV4X-1*.

Transformador Trifásico: Es necesario trabajar con voltajes mayores a los que entrega la red eléctrica, llegando hasta los 225 V para este estudio. Para conseguirlo se conecta un transformador trifásico al circuito con una relación de voltajes de 1:1.3545. De esta forma, es posible trabajar dentro de un rango de 0 V a 298 V.

Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)

Este dispositivo se encarga de recibir en tiempo real las señales generadas por un fenómeno enviando la información a un computador mediante una conexión USB. En este caso, recibe la información proveniente

de las termocuplas a través de cinco canales independientes, registrando las temperaturas radiales del estrato vegetal y almacenándolas en distintos archivos. La frecuencia utilizada en la adquisición de los datos es de 1.5 Hz por medio del dispositivo *IOtech Personal Daq 56 Series*.

También es utilizado para la caracterización del heater, en la cual, el DAQ procesa las señales enviadas por el radiómetro y registra los datos en el computador.

Computador

Receptor de la información proveniente del Sistema de Adquisición de Datos y de la balanza analítica vía puerto USB. Registra los datos en tiempo real mediante los software *Personal DaqView* y *AAC Keys* respectivamente, los cuales son analizados posteriormente utilizando los softwares *PostView*, *Matlab*, *Mathematica* y *MS Excel*.

Multímetro Digital

Mediante un multímetro digital *Keithley 2100 Series* se mide el voltaje y la intensidad de corriente a la entrada del heater con una precisión de hasta 0.1 μV en corriente alterna.

Armazón

Una estructura cúbica de lados de 50 cm resguarda el buen desarrollo de cada uno de los experimentos. Hecha con perfiles *Thorlabs* y cubiertas de *Plexiglas* en tres de las caras, dejando descubiertas la cara frontal y superior como se ve en la Fig. 3.1, de esta forma se garantiza la renovación natural de aire que sustente la combustión sin que existan corrientes que puedan afectar las mediciones.

4 | Metodología

4.1. Caracterización del Heater

4.1.1. Perfil de Radiación Incidente

Es necesario establecer el flujo de radiación incidente $\dot{q}''_{inc}$ en el estrato vegetal dados distintos voltajes, datos con los cuales se puede obtener una aproximación del flujo de radiación emitido $\dot{q}''_{emi}$ por el heater. Fue utilizado un radiómetro *Medtherm Schmidt-Boelter* modelo *GIW-10-32-485A* enfriado por agua. Al no poseer una ventana de zafiro, es necesario determinar si los efectos de la convección son o no despreciables en la caracterización, realizando mediciones al mismo voltaje con el radiómetro posicionado a 20 mm del eje del heater y a 40 mm ($r_i,\ i = 1, 2$), el flujo emitido $\dot{q}''_{emi}$ en ambos casos es calculado matemáticamente . Cabe mencionar que las diferencias fueron mínimas, por lo que se concluye que la convección no posee un rol determinante en este estudio.

Se posiciona el radiómetro a la distancia r_i deseada, luego se ajusta el transformador variable hasta obtener en la entrada del heater el voltaje necesario y se cierra el circuito, esperando 10 min hasta que se alcanza un estado estacionario. De forma remota se acciona el motor lineal y el descenso del heater comienza al igual que la adquisición de datos, donde el DAQ recibe las señales del radiómetro y las envía al computador, realizando un barrido completo a lo largo del eje z, obteniendo $\dot{q}''_{inc}(z)$. Al menos tres barridos son realizados por cada voltaje medido con los parámetros señalados en la Fig. 4.2.

Sea $\dot{q}''_{inc}(\theta, r, z)$ la radiación incidente medida por el radiómetro en el punto (θ, r, z) en coordenadas cilíndricas, entonces

$$d\dot{q}_{inc}(\theta, r_i, z) = \dot{q}''_{inc}(\theta, r_i, z)dA_i$$

donde $d\dot{q}_{inc}(\theta, r_i, z)$ denota el diferencial de radiación incidente proveniente desde el heater sobre un diferencial de área dA_i del estrato vegetal en la posición (θ, r_i, z). El diferencial de área representado en coordenadas cilíndricas está dado por $dA_i = r_i d\theta dz$, de esta forma

$$\dot{q}_{inc} = \int_0^h \int_0^{2\pi} \dot{q}''_{inc}(\theta, r_i, z) r_i d\theta dz$$

Asumiendo axisimetría tanto en el heater como en la radiación que emite, se puede afirmar que $\dot{q}''_{inc}(\theta, r_i, z) = \dot{q}''_{inc}(r_i, z)$, entonces

$$\dot{q}_{inc} = 2\pi r_i \int_0^l \dot{q}''_{inc}(r_i, z)dz \tag{4.1}$$

Con la Ec. 4.1 se obtiene el flujo de radiación incidente en unidades de potencia (W), al dividirlo por el área de la superficie expuesta a la radiación ($A_i = 2\pi r_i l$) se tiene la Ec. 4.2

$$\dot{q}''_{inc} = \frac{\int_0^l \dot{q}''_{inc}(r_i, z)dz}{l} \tag{4.2}$$

Las mediciones de radiación se realizan de forma intermitente a lo largo del heater, siendo necesario discretizar la Ec. 4.2

$$\dot{q}''_{inc} \approx \frac{\Delta z}{l} \sum_{k=1}^{n} \dot{q}''_{inc}(r_i, z_k) \tag{4.3}$$

donde n es el número de mediciones realizadas por el radiómetro a lo largo del eje z del heater, desde $z = 0$ hasta $z = l$.

Una vez determinado esto, es necesario tener en consideración que es sólo una fracción del flujo de radiación emitido por la fuente alcanza la superficie expuesta del estrato vegetal de la muestra. Relacionando la Ec. 2.5 con el concepto de reciprocidad se tiene que

$$\dot{q}''_{emi} = \frac{A_i}{A_h} \frac{\dot{q}''_{inc}}{F_{h\to i}} \tag{4.4}$$

donde $F_{h\to i}$ corresponde a la fracción de radiación emitida por la superficie del heater, A_h, y es interceptada por la superficie expuesta a radiación del estrato vegetal, A_i. Para el cálculo de $\dot{q}''_{emi}$ sólo resta conocer cuál es factor de forma $F_{h\to i}$ que aplica para la configuración geométrica de este experimento, dos cilindros concéntricos del mismo largo separados por una cierta distancia conocida. Es posible obtener este factor por medio de una discretización, técnica de Montecarlo o una expresión analítica.

Modest (2013) muestra una expresión analítica aplicable a este caso, solucionando el problema del factor de forma y, por ende, obtener el flujo de radiación emitido por el heater a voltajes determinados. El factor de forma corresponde a

$$F_{h\to i} = \frac{1}{\pi R_1}\left[\frac{1}{2}\left(R_2^2 - R_1^2 - 1\right)\arccos\left(\frac{R_1}{R_2}\right) - 2R_1 \arctan\left(R_2^2 - R_1^2\right)^{1/2} + \left(\left(1+A^2\right)\left(1+B^2\right)\right)^{1/2} \arctan\left(\frac{\left(1+A^2\right)B}{\left(1+B^2\right)A}\right)^{1/2} + \pi\left(R_1 - \frac{AB}{2}\right)\right] \tag{4.5}$$

donde $R_1 = r_h/h$, $R_2 = r_i/h$, $A = R_1 + R_2$ y $B = R_1 - R_2$.

De esta forma es posible obtener experimentalmente el flujo de radiación incidente sobre el estrato vegetal por medio de un escaneo a lo largo del heater con un radiómetro ubicado a una distancia r_i del eje de simetría,como se señala en la Fig. 4.3. Con esta información resumida en la Tabla 4.1, y aplicando las ecuaciones señaladas anteriormente es posible determinar el flujo de radiación emitida por la fuente de calor, resultados mostrados en la Fig. 4.1. En la Fig. 4.2 se observa que el heater emite mayor radiación en su centro ($l/2$), la cual se va atenuando hacia los extremos. Aplicando un voltaje de 225 V, la mayor cantidad de voltios con la cual se trabajó, se obtuvo un flujo radiativo máximo de 29.25 kW/m^2, el cual decrece hacia los extremo hasta 15.22 kW/m^2 (promedio de ambos extremos).

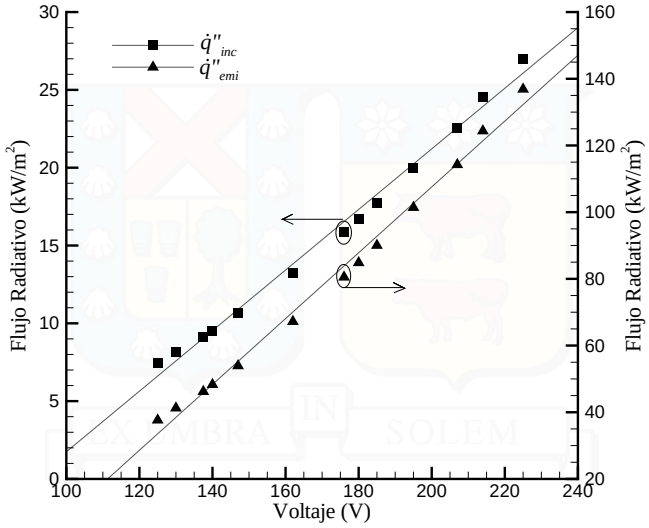


Figura 4.1: Flujo radiativo total emitido por el heater e incidente en el estrato vegetal a distintos voltajes.

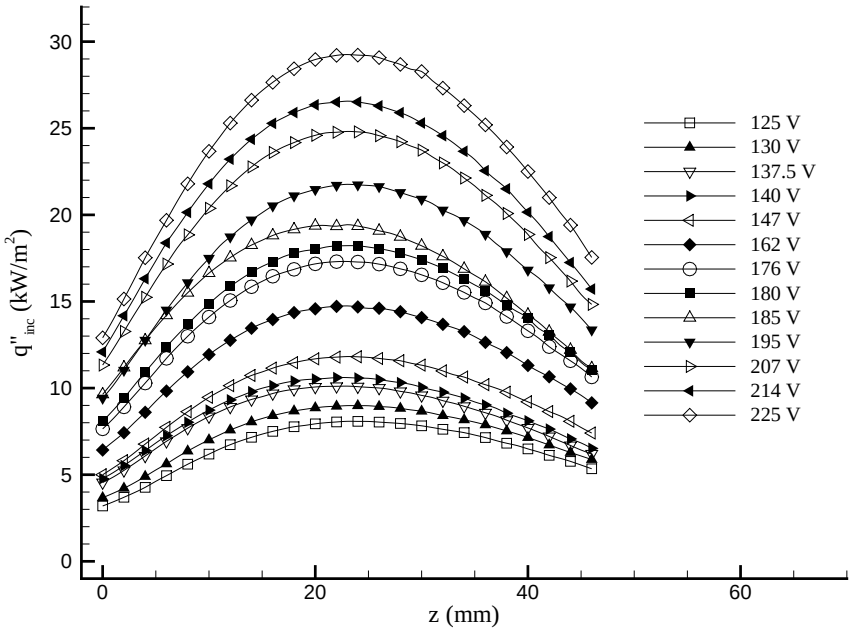


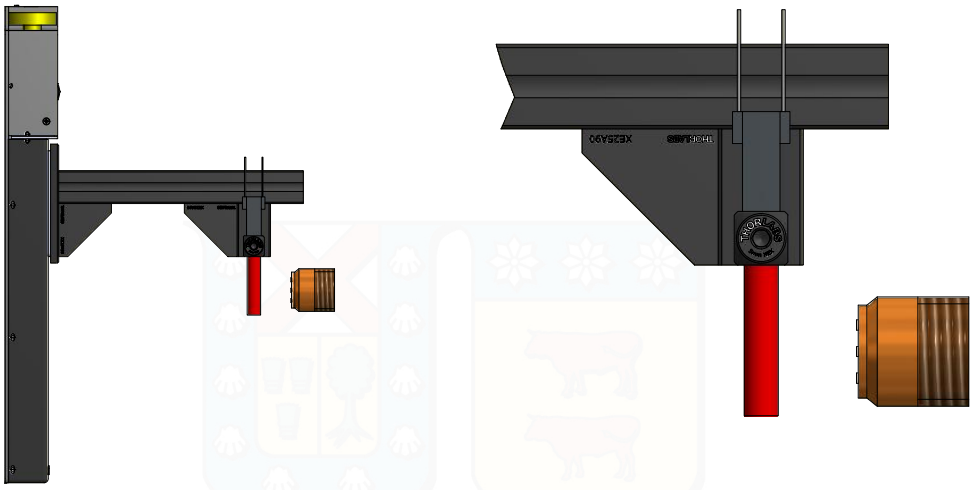
Figura 4.2: Flujo radiativo incidente en z y $r = r_i$ a distintos voltajes.

Tabla 4.1: Voltaje, intensidad de corriente y flujo radiativo incidente $\dot{q}''_{inc}$.

Voltaje (V)	$\dot{q}''_{inc}$ (kW/m2)
125	6.64
130	7.42
137.5	8.42
140	8.84
147	9.82
162	12.29
176	14.50
180	15.25
185	16.37
195	18.22
207	20.85
214	22.31
225	24.56

Tabla 4.2: Parámetros del proceso de caracterización del heater.

Herramienta	Parámetro		
Radiómetro Medtherm	Factor de Conversión	4926.0	kW/m^2V
	Ventana de Zafiro	No	–
DAQ Iotech	Frecuencia	2.0	Hz
	Período	0.5	s
Heater Bach RC	r_h	5.0	mm
	l	46.0	mm
	A_h	1.45×10$^{-3}	m^2
Discretización de la superf.	r_i	20.0	mm
del estrato	l	46.0	mm
	A_i	4.34×10$^{-3}	m^2
	$Deltaz$	1.0	mm
	dA_i	9.42×10$^{-5}	m^2
Motor lineal Thorlabs	Rapidez Lineal	2.0	mm/s



(a) Vista General Calibración **(b)** Detalle Calibración

Figura 4.3: Proceso de Calibración

4.1.2. Radiómetros Medtherm

Para que el perfil de radiación fuese obtenido, se llevó a cabo un largo proceso de mediciones. En una primera instancia se utilizó un radiómetro *Medtherm Schmidt-Boelter* con ventana de zafiro (*rad*1) para que actúe como filtro ante la posible convección incidente, tal y como se describe en el estudio de Hernández et al. (2017).

Una serie de experimentos fue realizada con el fin de validar la caracterización del heater al comparar los tiempos de ignición con el estudio ya mencionado. Los resultados vislumbraban grandes diferencias entre ambos estudios, un segundo radiómetro de la misma marca (*rad*2) fue instalado. Las características del segundo radiómetro difieren en algunos aspectos del primero, no tiene ventana de zafiro y además es enfriado permanentemente por un flujo de agua que circula en su interior. Las radiaciones registradas no coincidían entre ellas, teniendo diferencias de hasta 5 kW/m^2, en mediciones que no superaban los 27 kW/m^2.

Sin tener una explicación a lo ocurrido, un tercer radiómetro *Medtherm Gardon Gage* fue utilizado, con ventana de zafiro y enfriado por un flujo de agua. Nuevamente no había concordancia en los resultados. Se estableció contacto con personal de Medtherm Corporation en Estados Unidos para entender lo que sucedía.

La transmitancia óptima de las ventanas de zafiro utilizadas aplica dentro de un rango de longitud de onda determinado, aproximadamente entre 0.5 µm y 4.15 µm. Las ondas emitidas por el heater poseen una longitud mayor al rango mencionado según la información suministrada por Bach RC, i.e., las ventanas estaban actuando como un objeto opaco frente al fenómeno estudiado.

Una vez transcurrido todo este proceso es que se pudo realizar la caracterización radiativa del heater, siendo el segundo radiómetro mencionado, *rad*2, el elegido.

4.2. Caracterización de la Biomasa

4.2.1. Relación Superficie-Volumen

Se asume que las agujas de pino son cilíndricas, por lo que para el cálculo del ratio sólo es necesario conocer el largo (l_{fuel}) y su diámetro (ϕ_{fuel}).

$$\omega = \frac{4}{\phi_{fuel}} + \frac{2}{l_{fuel}} \tag{4.6}$$

Por medio de un código en MATLAB es posible obtener el valor de ω de las acículas de pino. Es necesario ordenar agujas de pino sobre una hoja de color blanco para luego ser escaneada, obteniendo una imagen similar a la presentada en la Fig. 4.4. Esta imagen es procesada por el algoritmo, el cual detecta los bordes de las agujas, cierra figuras abiertas, elimina el fondo, quita el ruido de la imagen y finalmente calcula las dimensiones basado en la proporción de pixeles/mm, parámetro proporcionado al código. Este método permite una gran cantidad de muestras de pino en poco tiempo, pudiendo obtener un valor más representativo.

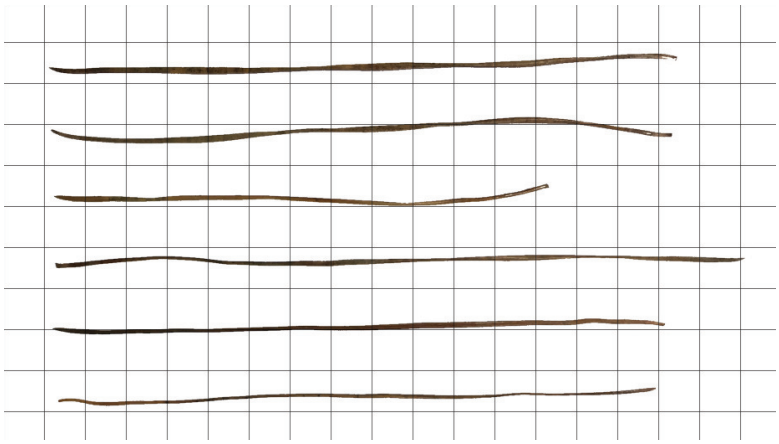


Figura 4.4: Muestra escaneada de agujas de pino.

Un resumen de los datos obtenidos manualmente son mostrados en la Tabla 4.3. Con un pie de metro electrónico, para cada acícula de pino se obtiene un diámetro medio $\overline{\phi}_{fuel}$ a partir de cinco mediciones realizadas a lo largo de la aguja (ϕ_i, $i = 1, ..., 5$). Las agujas de pino poseen formas irregulares, por lo que utilizar un diámetro medio es una consideración que debe ser realizada para disminuir la variabilidad intrínseca a estas diferencias. Luego de procesar los datos, se obtiene que $\overline{\omega} = 3{,}717.1 \pm 153.7$ m^{-1}.

Diversos estudios (Fernandes y Rego, 1998; Niinemets et al., 2002; Simeoni et al., 2012; Tihay et al., 2014) han determinado las propiedades físicas de agujas de pino de distintas variedades, tal y como se muestra en la Tabla 4.4. Los valores entregados por dichos estudios son muy similares a los obtenidos.

4.2.2. Densidad de Masa

Tihay et al. (2009) describe el procedimiento que permite determinar la densidad de masa de las

Tabla 4.3: Mediciones de ϕ_{fuel}, l_{fuel} y ω para agujas de pino radiata.

Muestra	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	$\overline{\phi}_{fuel}$ (mm)	l_{fuel} (mm)	ω (m^{-1})
1	1.18	1.33	1.15	1.34	1.00	1.20	125.90	3349.2
2	1.29	1.24	1.25	1.10	1.09	1.19	124.98	3366.1
3	0.91	1.02	1.02	0.88	1.03	0.97	99.35	4135.4
4	1.16	1.18	1.17	1.09	1.09	1.14	138.61	3529.4
5	1.05	1.09	1.13	1.07	0.99	1.07	122.89	3768.6
6	0.82	0.77	0.79	0.80	0.76	0.79	119.73	5092.8
7	1.28	1.24	1.29	1.20	1.12	1.23	135.08	3277.4
8	1.28	1.30	1.26	1.05	1.30	1.24	106.02	3249.9
9	1.15	1.23	1.06	1.09	1.13	1.13	113.83	3551.1
10	1.06	0.98	1.03	0.86	0.97	0.98	100.80	4101.5
11	0.90	0.97	1.09	1.01	0.94	0.98	120.16	4090.0
12	1.07	1.00	1.11	0.95	1.09	1.04	86.00	3854.7
13	1.41	1.33	1.36	1.43	1.27	1.36	128.74	2956.7
					Media	1.1	117.1	3717.1
					Error	0.04	4.2	153.7

Tabla 4.4: Resumen densidad de masa y relación superficie-volumen de acículas de pino para distintas variedades

Variedad de Pino	ρ_{fuel} (kg/m^3)	ω (m^{-1})	Ref.
Pinus Pinaster	511	3057	Tihay et al. (2014)
Pinus Halepensis	789	7377	Simeoni et al. (2012)
Pinus Pinea	690	6470	Fernandes y Rego (1998)
Pinus Ponderosa	560	5380	Fernandes y Rego (1998)
Pinus Palustris	485	4830	Niinemets et al. (2002)
Pinus Taeda	560	6024	Niinemets et al. (2002)

Tabla 4.5: Densidad de masa de nuestras de pino radiata medidas experimentalmente

Muestra	m_{fuel} (g)	v_{total} (cm^3)	ρ_{fuel} (kg/m^3)
1	1.94	13.2	606.47
2	2.12	12.8	756.93
3	1.77	13.8	464.37
4	2.36	13.4	693.38
5	2.10	13.3	636.06
6	2.03	13.3	613.64
7	1.91	13.3	578.76
8	2.11	13.5	601.6
9	1.92	13.2	600.88
10	2.38	14.0	595.5
11	1.76	12.8	627.79
12	1.58	12.6	607.62
		Media	615.25
		Error	19.81

agujas de pino empleado en este estudio, salvo que se utilizó alcohol isopropílico en lugar de etanol. Además se agrega un nuevo paso para corroborar que el material vegetal analizado no ha absorbido alguna cantidad del líquido empleado Keane (2015). Los pasos seguidos para determinar la densidad de masa son los siguientes:

1. Se mide la masa de una cantidad determinada de acículas de pino (m_{fuel}) y son puestas al interior de un tubo graduado.

2. Se miden 10 ml de alcohol isopropílico (v_{iso}) en un segundo tubo graduado.

3. Se agrega la totalidad del contenido del segundo tubo graduado en el primero y se mide el volumen total (v_{total}).

4. La densidad de masa (ρ_{fuel}) es calculada como $\rho_{fuel} = \dfrac{m_{fuel}}{v_{total} - v_{iso}}$.

5. Se retira la biomasa del tubo graduado, se seca superficialmente y luego se mide la masa total de la misma. Es necesario determinar si existen o no diferencias apreciables respecto a la masa medida inicialmente.

A pesar de que en en el procedimiento descrito por Tihay et al. (2009) es utilizado etanol, no existen diferencias en el método de medición. La densidad de ambos compuestos, alcohol isopropílico y etanol, son menores a la densidad del agua ($\rho_{iso} = 786$ kg/m^3 y $\rho_{etanol} = 789$ kg/m^3), cualidad que representa una ventaja, ya que esta cualidad hace menos favorable la flotación de las agujas.

Idealmente se debería ocupar un líquido cuya densidad sea menor a las de las acículas de pino, pero resulta difícil de conseguir por los bajos valores que posee, mostrados en la Tabla 4.4 según otros estudios de ignición para diversas variedades de pino. En la Tabla 4.5 se pueden ver los valores obtenidos para pino radiata en este estudio, siendo la densidad de masa del pino $\rho_{fuel} = 615.3 \pm 19.8$ kg/m^3.

4.2.3. Preparación de la Muestra

Para el desarrollo experimental llevado a cabo, fueron utilizadas acículas de pino radiata (*Pinus Radiata*) provenientes de la Región de Valparaíso, Chile, específicamente en el sector de Curauma, en un bosque cercano a sectores residenciales, i.e., zonas WUI. Las agujas de pino son recogidas directamente desde el suelo eliminando cualquier tipo de impurezas como flores secas, ramas, entre otras. Las muestras fueron obtenidas siempre del mismo sector del bosque señalado.

Es necesario eliminar el contenido de humedad presente en las muestras de pino a utilizar. Se secan las agujas en un horno especializado a 333 K por al menos 12 horas según el procedimiento descrito por Mindykowski et al. (2011). Luego de transcurrido este tiempo no se observan cambios en la masa de la muestra, por lo que es posible asumir que el contenido de humedad es cercano al 0 %. Tener en cuenta que inmediatamente luego de sacar el pino del horno, comienza un proceso de rehidratación producto de la humedad ambiente, por lo que se evita el mantener las agujas expuestas entre experimentos.

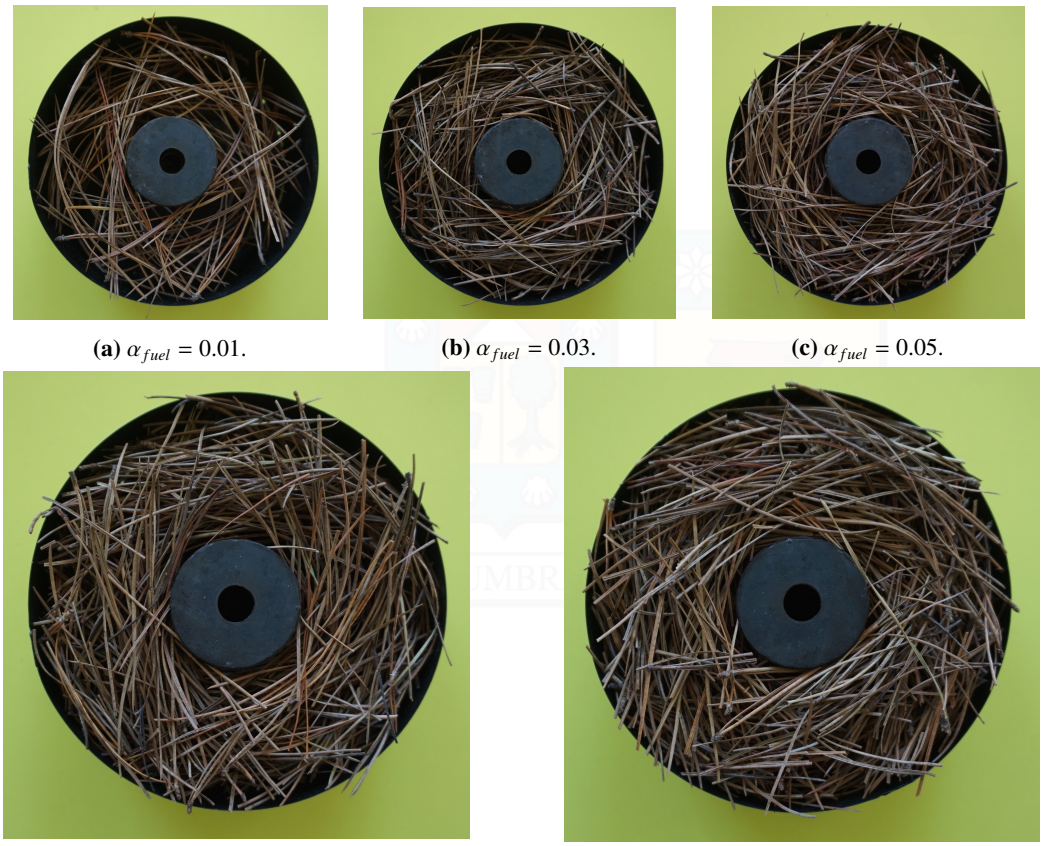
El horno fabricado por la empresa alemana *Memmert* permite fijar la temperatura interna de éste y el tiempo de secado, el cual transcurre sólo si la temperatura al interior se encuentra dentro de un rango acotado cercano a la temperatura fijada en un comienzo, asegurando las 12 horas de exposición necesarias a 333 K. Una válvula de salida permite un flujo de aire que extraiga la humedad acumulada en el horno.

4.2.4. Distribución del Estrato Vegetal

La preparación y distribución de la biomasa en el recipiente portamuestras representa un factor crucial en los resultados experimentales, por lo que una correcta estandarización reduce la variabilidad en los resultados, menor cantidad de experimentos fallidos y una reducción en el tiempo de preparación. A pesar de que el procedimiento establecido disminuye el tiempo necesario, aún así requiere de bastante tiempo. Está basado en los lineamientos entregados por Schuette (1965).

Es necesario recalcar que el procedimiento determinado debe realizarse de forma meticulosa por las consecuencias ya descritas. Los pasos a seguir son:

1. La malla interior del basket es recubierta con el fin de que las agujas no se introduzcan a través de la misma.
2. Se pesa previamente la cantidad de acículas de pino requerida para alcanzar el nivel de porosidad definido para cada experimento.
3. A mano son esparcidas las agujas de forma homogénea dentro de lo posible en el recipiente portamuestras, de tal forma de cubrir todo el volumen del mismo, evitando ejercer presiones que dañen el estrato dentro de lo posible.
4. Se pesa el conjunto del recipiente con el pino para corroborar que tenga la masa justa.
5. Es necesario cortar las agujas que sobresalen del basket.
6. Se recubre la parte superior del basket y se agita enérgicamente para distribuir las agujas de pino de forma más homogénea.
7. Se retira el recubrimiento superior e interior con la cautela pertinente.



(a) $\alpha_{fuel} = 0.01$. **(b)** $\alpha_{fuel} = 0.03$. **(c)** $\alpha_{fuel} = 0.05$.

(d) $\alpha_{fuel} = 0.07$. **(e)** $\alpha_{fuel} = 0.09$.

Figura 4.5: Fracciones en volumen experimentales trabajadas.

El basket fue llenado con masas iniciales de 33.3 g, 25.9 g, 18.5 g, 11.1 g y 3.7 g de agujas de pino. En la Tabla 4.6 se muestra un resumen con las características de la biomasa correspondientes a cada una. Es muy poca la literatura sobre la densidad aparente del estrato vegetal en zonas chilenas, pero Ottmar y Andreu (2007) realizan un análisis detallado sobre suelos y estratos vegetales en bosques con distintos tipos de pino, teniendo características similares a las que se encuentran en los bosques chilenos.

El autor mencionado describe la capa de material orgánico descompuesto (duff en inglés) y aquella que aún no se descompone y se encuentra sobre la primera (litter layer en inglés). En las Tablas 4.7 y 4.8 se muestran parte de sus resultados. La capa de biomasa descompuesta tiene una densidad aparente media de 53.84 kg/m^3, pero la capa que realmente importa para este estudio es la de material sin descomponer, encontrándose la densidad aparente entre 12.18 kg/m^3 y 19.51 kg/m^3. Estos valores se encuentran dentro de los valores establecidos para este estudio.

Tabla 4.6: Masa inicial $m_{fuel,i}$, densidad aparente ρ_b y la fracción en volumen de material combustible α_{fuel} con los cuales se trabajó.

$m_{fuel,i}$ (g)	ρ_b (kg/m^3)	α_{fuel} (-)
33.3	55.42	0.09
25.9	43.11	0.07
18.5	30.79	0.05
11.1	18.47	0.03
3.7	6.16	0.01

Tabla 4.7: Rango de profundidad de la capa y promedios de densidad aparente para estratos no descompuestos (Ottmar y Andreu, 2007).

Tipo de estrato	N	Profund. Media	Std. Dev.	Std. Error	$\overline{\rho}_b$	Std. Dev.	Std. Error
Pinus taeda	166	3.43	0.97	0.08	19.51	6.88	0.53
Pinus ellioti	229	4.27	1.22	0.08	19.06	5.91	0.35
Pinus echinata	176	3.45	0.84	0.05	17.12	5.12	0.35
Pino y corteza	127	3.48	0.94	0.08	16.42	4.68	0.44
Corteza	288	3.61	1.07	0.05	12.18	4.06	0.26
Todos (promedio)		3.66			16.86		

Tabla 4.8: Rango de profundidad de la capa y promedios de densidad aparente para estratos descompuestos (Ottmar y Andreu, 2007).

Tipo de estrato	N	Profund. Media	Std. Dev.	Std. Error	$\overline{\rho}_b$	Std. Dev.	Std. Error
Pinus taeda	133	1.98	1.17	0.10	60.02	26.21	2.29
Pinus ellioti	195	2.95	2.03	0.15	60.72	22.24	1.59
Pinus echinata	131	1.70	0.84	0.08	53.40	18.18	1.59
Pino y corteza	134	2.69	1.4	0.13	52.07	21.54	1.85
Corteza	211	2.24	1.55	0.10	42.72	24.10	1.68
Todos (promedio)		2.31			53.84		

4.3. Procedimiento Experimental

4.3.1. Descripción General

Más de 380 experimentos fueron llevados a cabo con el fin de medir el tiempo transcurrido hasta que se produzca la ignición (t_{ig}), los cambios de temperatura radial de la muestra ($TC_j(t)$) y la pérdida de masa de la misma, ambas en tiempo real, para distintos flujos radiativos incidentes ($\dot{q}''_{inc}$) y porosidades del estrato vegetal.

Una vez distribuida la cantidad requerida de acícula de pino en el portamuestras de manera uniforme, hay que posicionarlo sobre la balanza analítica y alinearlo concéntricamente con el heater. Es necesario ser riguroso en este punto debido a que un mal posicionamiento podría provocar daños permanentes en el equipo o la ignición producto del contacto directo del heater con alguna aguja de pino, teniendo que descartar los resultados obtenidos.

Luego se montan las cinco termocuplas en un soporte, de tal forma que queden distribuidas a lo largo del eje radial del recipiente a la mitad de la altura del mismo. Es necesario verificar nuevamente la concentricidad mencionada en el punto anterior para evitar inconvenientes. Ya con el material en posición, se procede con el transformador variable a regular el paso del voltaje, fijando el nivel necesario para el set de muestras y el interruptor que permite el paso de la corriente es accionado, el voltaje es constantemente medido con el multímetro digital a la entrada del heater. Durante la caracterización de la fuente de radiación, se observó que se demoraba alrededor de 7 min alcanzar un estado estacionario con respecto a la emisión de calor, por lo que se decide esperar 10 min, garantizando la estabilidad de la radiación incidente en el estrato.

Una vez transcurrido este tiempo, de forma remota se hace descender el heater por medio del motor lineal hasta aproximadamente 2 mm por sobre la base del recipiente para evitar el recalentamiento del mismo y no salir así del rango óptimo de temperatura al cual debe operar la balanza, a pesar de tener un aislante térmico como protección. Este proceso debe realizarse con sumo cuidado por algún posible error de alineación, ya que el margen es pequeño.

Cuando el heater alcanza el punto deseado, inmediatamente se comienza a cronometrar el tiempo al cual alcanza la ignición, junto a las mediciones de temperatura y masa. Recordar que el voltaje se está midiendo constantemente para contrarrestar posibles variaciones en la red eléctrica.

Al momento de iniciarse el proceso químico de ignición se detiene el cronómetro y el heater es llevado a su posición inicial, minimizando su exposición a las llamas. Temperaturas y masa siguen siendo medidas hasta que no exista combustión visible o los cambios de masa sean marginales. Cabe mencionar que se espera al menos 30 min antes de concluir que no se generará combustión alguna, una vez transcurrido este tiempo se detiene toda adquisición de datos.

4.3.2. Tiempo de Ignición

El tiempo desde que el heater se posiciona dentro del portamuestras hasta que las agujas de pino comienzan a arder con presencia sostenida de llama (flaming ignition) se definió como tiempo de ignición,

pudiendo ser determinado a partir del comportamiento de la pérdida de masa y la temperatura radial, pero se privilegia la observación directa utilizando un cronómetro, tal y como Babrauskas (2002) recomienda. En algunos casos aislados se dio lugar a una combustión sin presencia de llama, fenómeno conocido también como glowing (Boonmee y Quintiere, 2002), descartando dichos experimentos.

4.3.3. Temperatura del Estrato Vegetal

Cinco termocuplas, $TC_j (j = 1, ..., 5)$, se disponen de forma equidistante dentro del recipiente con la acícula de pino en dirección radial a 23 mm de la base para medir la temperatura del estrato vegetal. Cada una de ellas envía una señal eléctrica en tiempo real al DAQ, el cual almacena la información en el computador. Se inicia la adquisición de datos cuando el heater se posiciona dentro del portamuestras y se detiene una vez finalizado el proceso de combustión visible o cuando las diferencias de masa sean despreciables. TC_1 se encuentra en el perímetro interior del estrato, i.e., $r = r_i$, encontrándose a un centímetro de la siguiente.

4.3.4. Pérdida de Masa (MLR)

Para registrar este proceso experimental es necesario utilizar una balanza de alta precisión, debido a que la emisión de gases de pirólisis representa una variación de masa muy pequeña con respecto a la totalidad del estrato. Al poseer una exactitud de hasta 0.1 mg y una frecuencia de adquisición de datos de 1 Hz, la balanza elegida, *Shimadzu AUW-320*, es una excelente alternativa. La balanza se encuentra conectada al computador, enviando una señal con la masa registrada por la misma cada segundo transcurrido una vez iniciado el proceso de pirólisis, i.e., cuando el heater se posiciona dentro del portamuestras, deteniéndo cuando no exista combustión visible o las diferencias de masa sean despreciables. Se debe tener una planilla Excel abierta o Block de Notas para que los datos sean almacenados ahí.

Previo a esto es necesario encender la balanza, la cual iniciará automáticamente un proceso de calibración, luego asegurarse de tener activa la función AutoPrint a intervalos de 1 s.

4.3.5. Flujo Crítico Incidente

Se puede saber con certeza el flujo radiativo incidente en el estrato vegetal producto de una minuciosa calibración de la fuente calórica. Se inician las mediciones para cada una de las porosidades con el nivel de radiacón más alto establecido para este estudio, 24.56 kW/m^2, donde se tiene certeza que la ignición ocurrirá, para posteriormente disminuirlo de forma sistemática hasta determinar el rango en el que se encuentra el flujo crítico de radiación incidente, i.e., flujo máximo al cual no se produce ignición alguna, al menos al cabo de los 30 min previamente definidos.

La reducción de la radiación incidente se realiza en saltos de 2 kW/m^2 aproximadamente y para cada uno de estos niveles se registran las temperaturas, masa y tiempo de ignición dependiendo de la porosidad con la cual se está trabajando. Una vez que se concluye que el nivel radiativo que se le está aplicando no es suficiente para generar la combinación necesaria entre gases y temperatura para que la ignición se desarrolle, $\dot{q}''_{no\ ig}$, el flujo inmediatamente anterior es denominado $\dot{q}''_{min,ig}$.

Hasta este punto se sabe que el flujo crítico incidente, $\dot{q}''_{inc,cri}$, está dentro del intervalo $\left[\dot{q}''_{no\ ig}, \dot{q}''_{min,ig}\right[$, entonces el nuevo nivel de radiación a utilizar se define como $\dot{q}''_{new\ test} = \left(\dot{q}''_{no\ ig} + \dot{q}''_{min,ig}\right)/2$. Se repite nuevamente esta metodología hasta alcanzar una resolución de 0.5 kW/m^2.

4.4. Estimación del Error Experimental

Por muy riguroso que se sea al momento de realizar una medición experimental, siempre existirá algún grado de variabilidad en los resultados por la naturaleza misma del proceso y la inevitable incertidumbre del mismo. Es a esta incertidumbre que se le denomina error.

Se realiza un análisis estadístico de incertidumbres aleatorias, por ende, para conocer la variabilidad de los experimentos, se puede aplicar el concepto de desviación estándar muestral también conocido como Root Mean Square (RMS) (Taylor, 1997)

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum (x_i - \overline{x})^2} \tag{4.7}$$

donde σ_x representa la desviación estándar de las medidas $x_1, ..., x_n$ de una muestra de tamaño N. Cuando las incertidumbres sistemáticas son despreciables, el error asociado a la repetitividad de los experimentos u_a, se define como la desviación estándar de la media, o SDOM por sus siglas en inglés (Taylor, 1997)

$$u_a = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \tag{4.8}$$

Por otra parte, como el error experimental es mucho mayor al instrumental, entonces el error total asociado a la variable x, u_x, se asemeja al de los experimentos, $u_x \approx u_a$.

5 | Resultados Experimentales

5.1. Tiempo de Ignición

Tiempos de ignición t_{ig} para distintos niveles de radiación incidente y porosidad del estrato vegetal han sido medidos en base a la metodología ya descrita. El tiempo de ignición fue determinado con ayuda de un cronómetro mediante reconocimiento visual de la aparición sostenida de una llama. Sin perjuicio de lo anterior, tal y como se describe en otros estudios de entre los cuales destaca Boonmee y Quintiere (2002), fue posible observar glowing en las agujas más cercanas a la fuente de calor previo al proceso de ignición.

A pesar de ser un método simple, fácil de utilizar y confiable, existen otras dos formas de detectar el momento en el cual ocurre la ignición. En las Fig. 5.4 y 5.2 se aprecia la pérdida de masa normalizada y la temperatura interior medida por TC_1 respectivamente para distintos estratos, variables mencionadas en la Sección 3.1 a partir de las cuales se basan los dos métodos que se explicarán a continuación.

Cuando comienza la reacción en cadena del proceso de combustión, η experimenta un cambio brusco en su pendiente, debido a la ignición, la pérdida de masa es mucho más rápida que durante el proceso de pirolización, pudiendo determinar t_{ig} a partir de la pendiente $\frac{d\eta}{dt}$.

La otra forma es a partir de la temperatura. Al igual que con la pérdida de masa, la temperatura experimenta un alza brusca una vez producida la ignición. La pendiente $\frac{dT}{dt}$ refleja esta situación. Debe ser a partir de las mediciones de TC_1 y no de las demás termocuplas, debido a que la ignición tiene un desfase a lo largo del eje radial, tardándose en alcanzar las demás termocuplas algunos segundos.

Si bien los tres métodos son confiables, en algunos experimentos los cambios de las pendientes $\frac{d\eta}{dt}$ y $\frac{dT}{dt}$ no resultan ser tan evidentes como para determinar con precisión el momento en el que se produce la ignición.

En la Fig. 5.1b se muestra el comportamiento del inverso del tiempo de ignición, $1/t_{ig}$, en función de $\dot{q}''_{inc}$ considerando una aproximación thermally thin. Para todos los niveles de porosidad es evidentemente un comportamiento cuasi-lineal, descrito también en la literatura para ignición piloteada y espontánea de biomasa. Mindykowski et al. (2011), McAllister et al. (2012) y McAllister y Finney (2017) han utilizado exitosamente esta aproximación.

5.2. Flujo Crítico Incidente

Para cada fracción en volumen de material combustible α_{fuel} con los cuales se trabajó, fue necesario determinar un flujo crítico de radiación incidente. Se da comienzo a la campaña experimental para cada α_{fuel} con un nivel de radiación que garantice la ignición. Entonces, 225 V son suministrados al sistema, lo que se traduce en un flujo de 24.56 kW/m^2, decreciendo sistemáticamente hasta alcanzar el flujo crítico de radiación $\dot{q}''_{inc,cri}$, flujo mínimo al cual el estrato vegetal enciende.

30 minutos de exposición fueron esperados hasta afirmar que el estrato no arderá. Para refinar el valor es implementado el procedimiento descrito por Mindykowski et al. (2011), el cual consiste básicamente en que el flujo crítico se encuentra entre el mínimo flujo de radiación al cual enciende la muestra ($\dot{q}''_{min,ig}$) y el máximo valor al cual no es posible lograr la ignición espontánea. Luego, por dicotomía son refinados los resultados obteniendo una resolución de 0.5 kW/m^2.

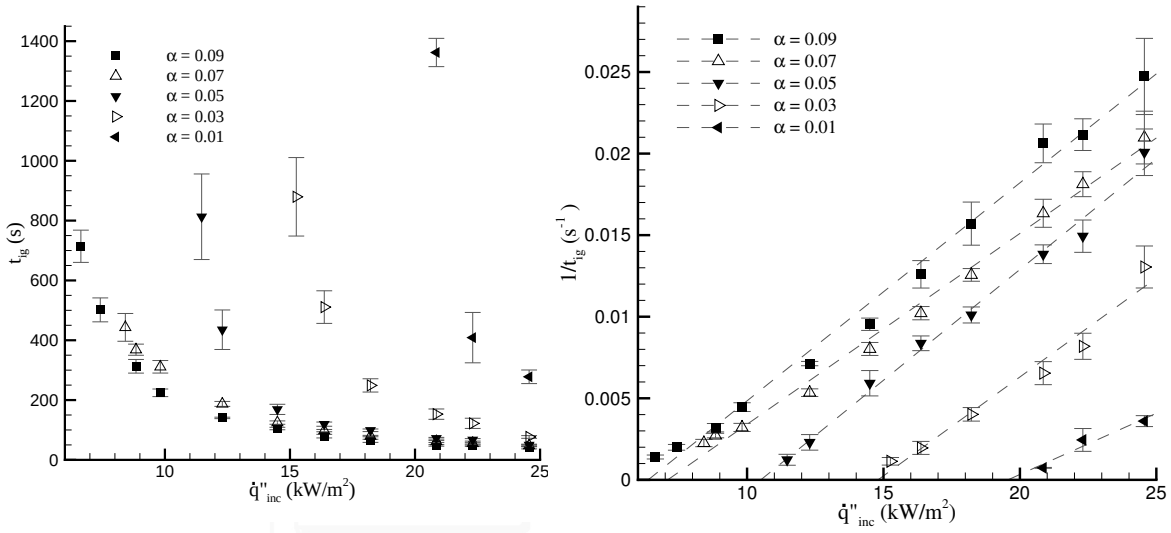
A medida que el flujo suministrado se acerca al valor crítico, la variabilidad de los experimentos aumenta considerablemente, por lo que en las mediciones cercanas a este punto se aumentó la cantidad de las mismas.

Los resultados obtenidos para los tiempos de ignición espontánea se presentan en la Fig. 5.1a, donde es posible apreciar las diferencias entre los tiempos para distintas fracciones en volumen del estrato vegetal. En la Tabla 5.1 se muestran los flujos críticos de radiación incidente identificados para cada una de las porosidades con las que se trabajó. Para cualquier flujo de radiación menor, la muestra no encendió.

Es necesario mencionar que para una fracción en volumen de 0.01, fue extremadamente complicado encontrar un valor crítico con la suficiente cantidad de mediciones. En reiteradas ocasiones, una o dos agujas comenzaban con el proceso de combustión incandescente sin generar llama, fenómeno que se traspasaba a las demás al entrar en contacto, quemando gran parte de la biomasa sin producir una ignición con llama visible. Es tan baja la cantidad de material vegetal, que alcanzar una mezcla de gases combustible es complejo. Esta situación se logró apreciar en otras porosidades con bajo flujo de radiación, pero luego de que se encendieran un par de agujas, las condiciones se tornaban propicias para la ignición espontánea con presencia de llama sostenida.

Tabla 5.1: Flujo crítico de radiación incidente $\dot{q}''_{inc,cri}$ para cada fracción en volumen α_{fuel}.

α_{fuel} (-)	$\dot{q}''_{inc,cri}$ (kW/m^2)
0,09	6,45
0,07	8,25
0,05	11,26
0,03	15,02
0,01	20,58



(a) Tiempo de ignición en función de $\dot{q}''_{inc}$ para las distintas porosidades.

(b) Inverso del tiempo de ignición en función de $\dot{q}''_{inc}$ para las distintas porosidades.

Figura 5.1: Tiempo de ignición a diferentes flujos radiativos incidentes y porosidades.

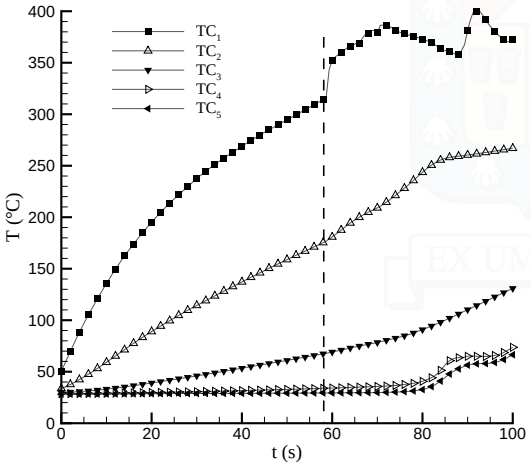
5.3. Temperatura del Estrato

Como fue explicado en la Sección 4, cinco termocuplas, TC_j ($j = 1, ..., 5$), fueron dispuestas dentro del recipiente portamuestras radialmente y equidistantes entre ellas a través de las acículas de pino a 23 mm de la base con el objetivo de estudiar la evolución temporal de su temperatura. TC_1 se encuentra en el perímetro interior del estrato, i.e., $r = r_i$, y TC_5 es la termocupla más alejada de la fuente de calor.

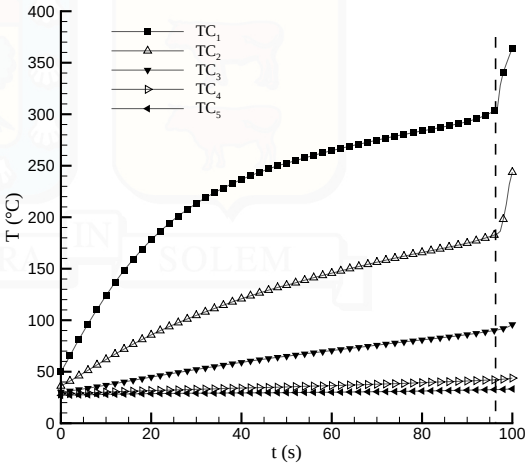
Las Fig. 5.2a y 5.2b muestran el comportamiento típico de una medición de temperaturas durante un transcurso de tiempo para los niveles de radiación y porosidad indicados en las figuras. En ambas es posible observar con claridad que las primeras dos termocuplas, las más cercanas al heater, son las más afectadas por la radiación incidente, mientras que en las dos últimas el efecto es casi despreciable. Esto puede ser explicado en base al espesor de penetración δ, al considerar el estrato como un lecho poroso, donde el efecto de la radiación disminuye a medida que el espesor de control aumenta, hasta llegar a no tener mayor incidencia.

El espesor de penetración también puede visualizarse en la Fig. 5.2c, donde se presenta la evolución de la temperatura a lo largo del eje radial del estrato vegetal para $\alpha_{fuel} = 0.09$ dado un tiempo fijo de 28 s. Como es de esperar, la temperatura disminuye a medida que $\dot{q}''_{inc}$ lo hace, independiente de la posición en la que sea medida.

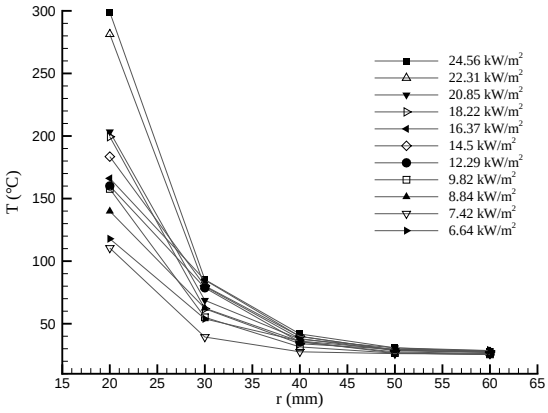
El comportamiento típico de las temperaturas radiales cuando el flujo de radiación incidente no es suficiente para que la muestra comience a arder es mostrado en la Fig. 5.3. En ambos casos su muestra la evolución de las temperaturas para flujos muy cercanos al crítico respectivo. Cuando no existe ignición, la energía entrega por el heater al estrato vegetal se equilibra con las pérdidas que éste tiene, alcanzando un estado estacionario en el perfil de temperatura, situación respaldada por Torero (2016).



(a) Evolución temporal de temperaturas radiales, $\dot{q}''_{inc}$ = 18.22 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.09.

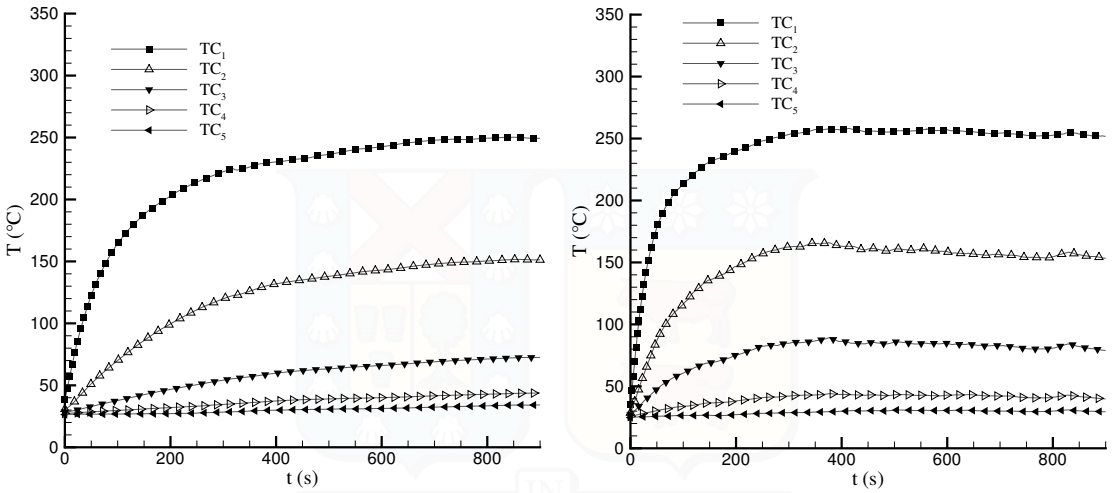


(b) Evolución temporal de temperaturas radiales, $\dot{q}''_{inc}$ = 18.22 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.05.



(c) Evolución espacial de temperaturas en el eje r, distintos $\dot{q}''_{inc}$ y α_{fuel} = 0.09.

Figura 5.2: Evolución temporal y espacial de la temperatura del estrato vegetal antes de la ignición.



(a) $\dot{q}''_{inc}$ = 6.25 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.09. **(b)** $\dot{q}''_{inc}$ = 11.06 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.05.

Figura 5.3: Evolución de la temperatura del estrato vegetal cuando no se produce ignición.

Shoub y Bender (1964) determinaron un flujo crítico de ignición espontánea para la madera de 4.3 kW/m^2, sin embargo, sus experimentos llegaron a extenderse entre 3.9 horas y 5.2 horas. En base a esta situacón, existe la posibilidad de que pudiera provocarse la ignición del estrato vegetal a los niveles radiativos reportados en las Fig. 5.3a y 5.3a si se expusieran por mayor tiempo al esperado en este estudio.

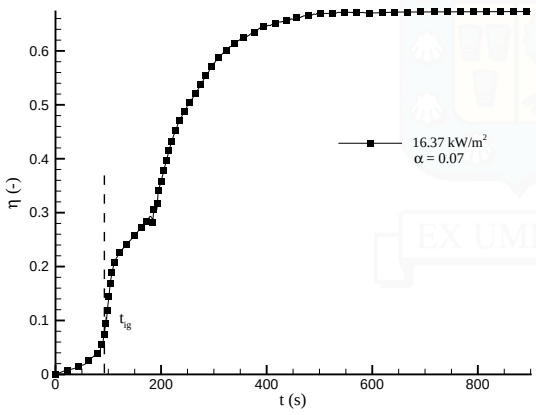
Cabe mencionar que si se comparan las Fig. 5.2a y 5.2b, el efecto de la ignición es más claro en una de ellas, esto respalda la decisión de determinar el tiempo de ignición mediante inspección visual. Si bien es apreciable el cambio en la pendiente de la temperatura indicada por TC_1 en la Fig. 5.2a, no es tan evidente.

$\dot{q}''_{inc}$ = 11.06 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.05.

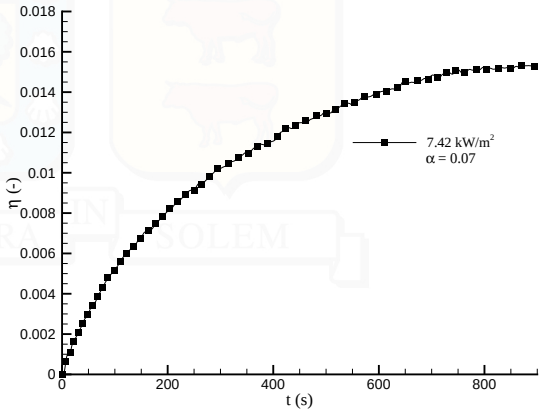
5.4. Pérdida de Masa

Variaciones extremadamente pequeñas de masa del estrato vegetal pueden ser detectadas por la balanza utilizada con gran precisión y confiabilidad, particularmente durante el proceso de pirólisis, donde el desprendimiento de gases representa pérdidas de masa pequeñas. Como ya fue mencionado en secciones anteriores, la pérdida de masa normalizada se define como $\eta = 1 - m_t/m_0$ y la tasa de pérdida de masa (MLR por sus siglas en inglés) como $\frac{d\eta}{dt}$. Algunos resultados típicos de mediciones de masa se presentan en la Fig. 5.4, en las Fig. 5.4a y 5.4b mediciones cuyo flujo de radiación incidente fue suficiente para alcanzar la ignición espontánea y en las Fig. 5.4d y 5.4c resultados de experimentos en los cuales no se evidenció ignición.

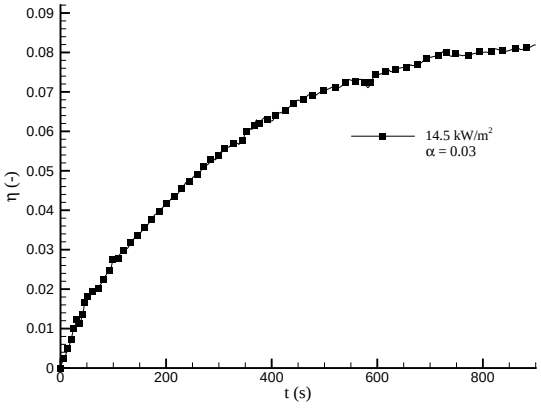
En las Fig. 5.5a y 5.5b es posible analizar más en detalle la pérdida de masa normalizada y su pendiente, respectivamente. Ambos gráficos representan el comportamiento de la masa del estrato vegetal durante todo el proceso, desde la pirólisis hasta la combustión. En la Fig. 5.5a se muestran resultados



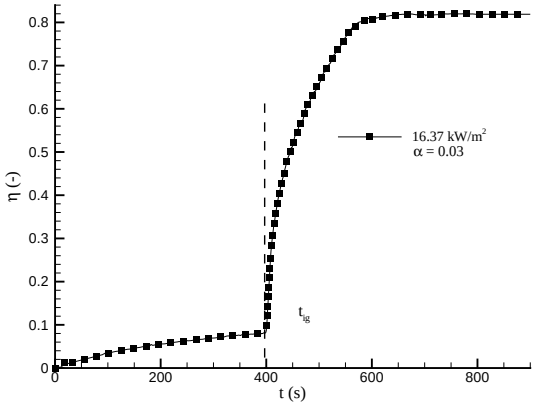
(a) Pérdida de masa normalizada cuando la ignición tiene lugar, $\dot{q}''_{inc}$ = 16.37 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.07.



(b) Pérdida de masa normalizada cuando la ignición no tiene lugar, $\dot{q}''_{inc}$ = 7.42 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.07.

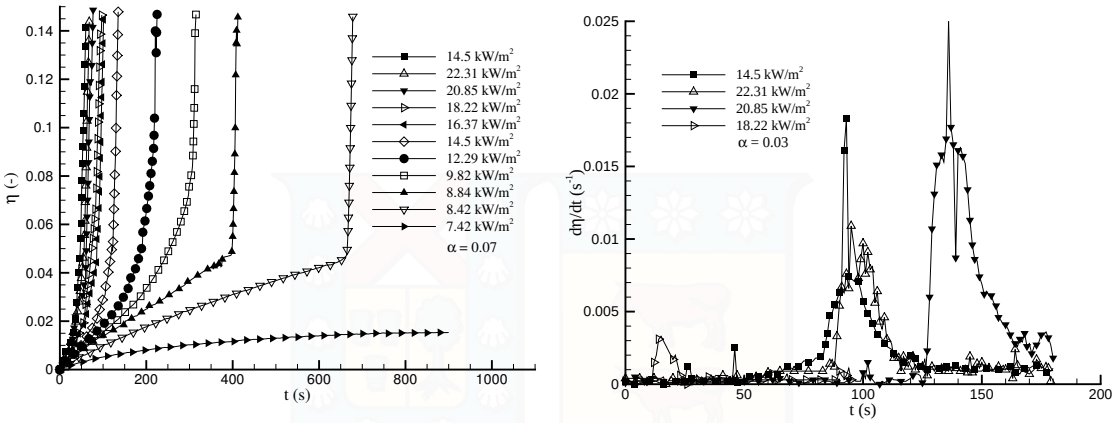


(c) Pérdida de masa normalizada cuando la ignición no tiene lugar, $\dot{q}''_{inc}$ = 14.5 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.03.



(d) Pérdida de masa normalizada cuando la ignición tiene lugar, $\dot{q}''_{inc}$ = 16.37 kW/m^2 y α_{fuel} = 0.03

Figura 5.4: Evolución temporal de η.



(a) Pérdida de masa normalizada para distintos $\dot{q}''_{inc}$ y $\alpha_{fuel} = 0.07$.

(b) MLR para $\alpha_{fuel} = 0.03$.

Figura 5.5: Evolución temporal de η.

representativos para un $\alpha_{fuel} = 0.07$ a distintos flujos radiativos incidentes, desde un flujo máximo de 24.56 kW/m^2 descendiendo hasta el flujo crítico, cuyo valor es de 8.42 kW/m^2, evidenciando la incidencia de $\dot{q}''_{inc}$ sobre η, mayores $\dot{q}''_{inc}$ se traducen en menores tiempos de ignición y una mayor MLR. En la Fig. 5.5b es evidente el cambio en la pendiente $\dfrac{d\eta}{dt}$ y la incidencia que tiene la fracción de volumen en los resultados, análogo a lo descrito anteriormente, a mayores α_{fuel} menor es el tiempo de ignición.

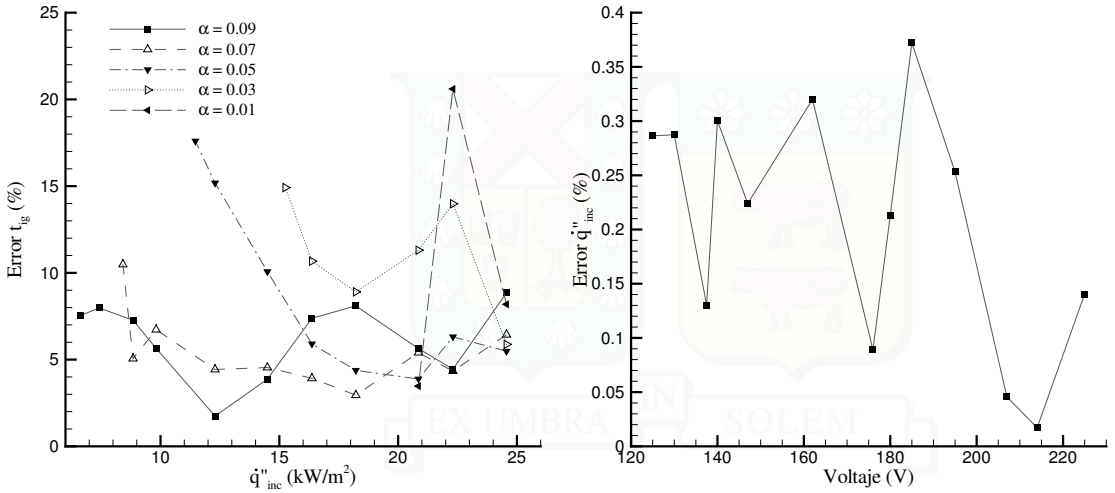
5.5. Error Experimental

En cada uno de los resultados mostrados, estimación del tiempo de ignición, pérdida de masa, MLR y temperatura de ignición, el error experimental es de gran importancia producto de la aleatoriedad propia del arreglo físico (Babrauskas, 2002; Torero, 2016). Cada una de las partes del experimento y los pasos seguidos aporta al incremento de la variabilidad, pudiendo disminuirla con un trabajo meticuloso y realizando múltiples repeticiones. El error presentado en los siguientes gráficos ha sido calculado utilizando las Ec. 4.7 y 4.8 para luego ser llevado a porcentaje utilizando el valor promedio como referencia.

El error experimental porcental del tiempo de ignición t_{ig} es presentado en la Fig. 5.6a. Puede ser explicado por la variabilidad inherente de los procesos físicos y de la estructura y distribución del estrato vegetal, como ya se ha mencionado a lo largo de este trabajo. Se puede apreciar que para fracciones en volumen (α_{fuel}) más altas, existe un menor error experimental, destacando as dos fracciones más altas que no superan el 10 % de error. A nivel global, el caso menos favorable ronda el 20 %. Esto valida el diseño experimental y la metodología utilizada.

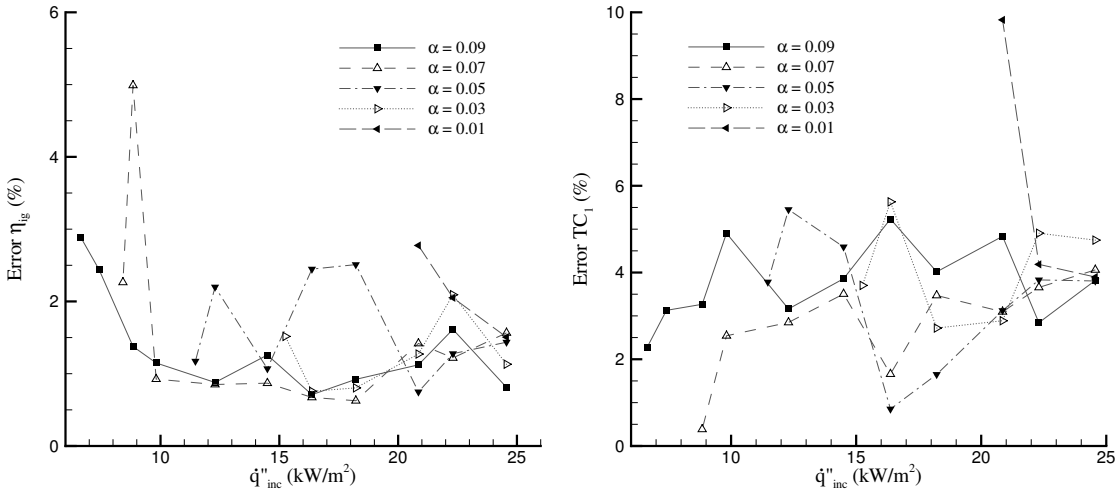
En la Fig. 5.6b se presenta el error experimental para la radiación incidente medida con el radiómetro. Por la confiabilidad que otorga el heater en la emisión a lo largo del tiempo y la gran precisión del radiómetro utilizado, el error obtenido es menor al 0.5 %. Estos resultados validan el proceso de caracterización efectuado de la fuente emisora de calor.

El error experimental porcentual asociado a la pérdida de masa normalizada (η) es mostrado en la



(a) Estimación del error experimental de t_{ig}. **(b)** Estimación del error experimental de $\dot{q}''_{inc}$.

Figura 5.6: Estimación del error experimental de t_{ig} y $\dot{q}''_{inc}$.



(a) Estimación del error experimental de η. **(b)** Estimación del error experimental de T_{ig}.

Figura 5.7: Estimación del error experimental de η y T_{ig}.

Fig. 5.7a. Si bien el error no supera en ningún caso el 5 %, un gran número de mediciones de masa tuvieron que ser descartadas producto de ruido excesivo en las mismas. A pesar de que visualmente el arreglo de las termocuplas y el recipiente pareciese ser el correcto, el movimiento mismo de las agujas de pino al interior empujaba las termocuplas, provocando alteraciones drásticas en muchos de los resultados. Se realizaron conjuntos de mediciones sin termocuplas para eliminar esta fuente de error dando excelentes resultados. Dicho esto, es recomendable realizar las mediciones de temperatura y masa por separado. Una segunda fuente de error son las corrientes de aire producto del fenómeno convectivo, aún cuando esté cubierto por paredes de Plexiglas, pero como se muestra en los resultados de error, no es determinante.

EX UMBRA
IN
SOLEM

6 | Conclusiones y Comentarios

Un estudio experimental sobre la ignición espontánea de un lecho poroso representativo de un combustible forestal producido por el fenómeno de spotting fue llevado a cabo. Fue utilizado un montaje experimental (IFIT) adecuado para entender, entre otras, la relación que existe entre el tiempo de ignición del estrato vegetal y el flujo de radiación incidente, para distintas porosidades. El flujo radiativo fue sistemáticamente variado en la búsqueda de un nivel crítico al cual el estrato ya no pudiese alcanzar las condiciones necesarias para generarse la ignición espontánea del mismo.

Para alcanzar el objetivo, la partícula incandescente denominada pavesa (firebrand en inglés) fue idealizada por medio de una resistencia eléctrica cilíndrica de nitruro de silicio, basado en diversos estudios que caracterizan las principales formas geométricas de las pavesas encontradas en incendios forestales reales. Su tamaño también fue elegido cuidadosamente siguiendo la misma lógica anterior. Se realizó la caracterización del mismo, obteniendo el flujo de radiación incidente en el estrato proveniente del heater en función del voltaje suministrado al sistema.

También el estrato fue elegido cuidadosamente, buscando representatividad de la vegetación presente en bosques y plantaciones forestales chilenas, teniendo especial énfasis en las que se encuentran en una zona de interfaz (WUI). *Pinus Radiata* es la especie vegetal escogida debido a que representa un alto porcentaje de la superficie total de bosques forestales, siendo un combustible típico en incendios forestales y de interfaz. Acículas de este tipo de pino fueron distribuidas de forma anular en un recipiente portamuestras en distintas cantidades pre-establecidas para cada uno de los experimentos. Al interior de la muestra se posicionó un heater hasta alcanzar la ignición de la biomasa, registrando la temperatura radial y pérdida de masa durante todo el proceso.

Cinco tipos estrato de acículas de pino radiata, cada uno con una porosidad o fracción en volumen distinto, fueron expuestos a flujos radiativos provenientes de una fuente emisora de calor.

En lo que concierne a los tiempos de ignición, los principales resultados y conclusiones son:

1. Los experimentos realizados dan cuenta que la relación entre el inverso del tiempo de ignición ($1/t_{ig}$ y el flujo de radiación incidente en el estrato vegetal ($\dot{q}''_{inc}$) es cuasi-lineal, independiente de la porosidad con la que se trabaje. Esta relación es común en materiales del tipo thermally thin, lo que permite validar la aproximación para algún desarrollo teórico.

2. El mínimo tiempo de ignición válidamente registrado en un experimento se obtuvo para el máximo flujo radiativo de 24.56 kW/m^2 y fracción en volumen más alta, de 0.09. Tardó 30 segundos en alcanzar la ignición. El menor tiempo de ignición medio también se dio para las variables mencionadas, siendo de 40 segundos.

3. El máximo tiempo de ignición válidamente registrado en un experimento se obtuvo para un flujo radiativo de 11.47 kW/m^2 y fracción en volumen de 0.05. Tardó 1,576 segundos en alcanzar la ignición. El menor tiempo de ignición medio se dio para una fracción en volumen de 0.01, la más baja, y un nivel de radiación incidente de 20.85 kW/m^2, siendo de 1,362 segundos. Cabe mencionar que mientras más cercano se encuentre el flujo al valor crítico, el tiempo de ignición tenderá a ser considerablemente más variable.

4. En general, los porcentajes de errores experimentales asociados a las mediciones de tiempo de ignición fueron relativamente bajos. Si bien hay dos de los cuales se encuentran entre un 17 % y un 20 %, la gran mayoría no supera el 10 % de error experimental, siendo un excelente indicador de la replicabilidad de los experimentos realizados. También avalan la confiabilidad de la metodología utilizada y el diseño experimental en su conjunto, permitiendo obtener un rango acotado de variabilidad. En muchos casos, los errores se incrementan cercanos al valor de radiación crítico, a pesar de aumentar el número de mediciones en esos casos, por la variabilidad inherente al fenómeno.

5. El cambio abrupto de las pendientes de las curvas de temperatura del estrato y pérdida de masa permite determinar el momento en el cual ocurre la ignición, mas no es del todo visible en algunos casos, como se muestra en el Capítulo 5. Por este motivo, es recomendable determinar el tiempo de ignición de la muestra por medio de un reconocimiento visual y empleando un cronómetro, garantizando la confiabilidad de los resultados.

6. La fracción en volumen más baja utilizada en este estudio, $\alpha_{fuel} = 0.01$, presentó reiteradas veces un comportamiento singular cuando el flujo de radiación incidente rondaba el valor crítico. Las agujas se quemaban de manera independiente sin presencia de llama y sin alcanzar la ignición espontánea buscada hasta consumir casi la totalidad del estrato. Según lo observado, esta porosidad en particular es extremadamente influenciada por la disposición de las agujas de pino en el basket, siendo ésta la principal fuente de variabilidad para esta fracción.

El flujo crítico de radiación incidente $\dot{q}''_{inc,cri}$ es un punto común de estudio dentro de las distintas investigaciones relacionadas. Las principales conclusiones obtenidas son:

1. Para las muestras con una fracción en volumen $\alpha_{fuel} = 0.01$ el flujo crítico de radiación incidente corresponde a $\dot{q}''_{inc,cri} = 6.64$ kW/m^2.

2. Para las muestras con una fracción en volumen $\alpha_{fuel} = 0.03$ el flujo crítico de radiación incidente corresponde a $\dot{q}''_{inc,cri} = 8.42$ kW/m^2.

3. Para las muestras con una fracción en volumen $\alpha_{fuel} = 0.05$ el flujo crítico de radiación incidente corresponde a $\dot{q}''_{inc,cri} = 11.47$ kW/m^2.

4. Para las muestras con una fracción en volumen $\alpha_{fuel} = 0.07$ el flujo crítico de radiación incidente corresponde a $\dot{q}''_{inc,cri} = 15.25$ kW/m^2.

5. Para las muestras con una fracción en volumen $\alpha_{fuel} = 0.09$ el flujo crítico de radiación incidente corresponde a $\dot{q}''_{inc,cri} = 20.85$ kW/m^2.

6. Flujos radiativos menores al crítico ($\dot{q}''_{inc} < \dot{q}''_{inc,cri}$) no generaron ignición alguna, extendiéndose la espera por más de 30 minutos.

7. Existe una clara tendencia en relación a la cantidad de masa de agujas de pino repartidas en el recipiente

y el flujo crítico. Mientras mayor sea α_{fuel}, menor será $\dot{q}''_{inc,cri}$. Existen dos explicaciones que se le podrían a dar frente a este comportamiento. La primera radica que al existir mayor cantidad de masa expuesta al calor emitido por el heater (mayores α_{fuel}), mayor es la producción de gases de pirólisis que emanan del estrato, alcanzando una mezcla combustible óptima para flujos de radiación más bajos. La segunda explicación se asocia al espacio vacío o libre de combustible dentro del recipiente, por el cual pasan corrientes convectivas que disipan el calor y los gases combustibles, menor fracción en volumen implica mayores espacios vacíos y, por ende, mayor disipación de calor y gases.

8. Refinando el valor del flujo crítico incidente por dicotomía, la resolución alcanzada fue de 0.5 kW/m^2, teniendo que desarrollar un gran número de mediciones.

Las principales conclusiones con respecto a la masa del estrato vegetal y cómo varía con el pasar del tiempo durante el proceso de pirólisis y posterior combustión en los experimentos, son mostradas en los siguientes puntos:

1. La pérdida de masa normalizada muestra un crecimiento sostenido y cuasi-lineal hasta el momento en el cual ocurre la ignición. La tasa a la cual se pierde masa producto del calor proveniente del heater tiene directa relación con la liberación de gases, ambas dependientes del flujo de radiación incidente y la porosidad del estrato vegetal.

2. Una vez ocurrida la ignición del estrato vegetal, la tasa de liberación de gases combustibles aumenta considerablemente, independiente de la fracción en volumen del estrato o el flujo de radiación incidente.

3. A menor porosidad (mayor fracción en volumen), la MLR es mayor. Esta relación se sustenta en el hecho ya explicado de que la cantidad disponible de biocombustible en la muestra condiciona la cantidad de gases de pirólisis emanados y, por lo tanto, el tiempo de ignición.

4. Producto de las termocuplas insertas en el estrato, un gran número de mediciones de masa resultaron alteradas. Producto de la variación de la temperatura en las agujas, éstas comienzan a moverse y, en algunos casos, empujan las termocuplas provocando cambios drásticos y anormales en las mediciones de masa. Algunas mediciones de masa fueron realizadas sin termocuplas, pero se recomienda que la totalidad se haga de esta manera.

Con respecto al comportamiento de la temperatura del estrato durante el proceso experimental se pueden inferir algunas conclusiones:

1. Se evidencia un aumento sostenido en el tiempo de la temperatura hasta alcanzar la ignición. Como se mostró en la Sección 5.3, con los valores determinados para TC_1 es posible afirmar que no existe un incremento cuasi-lineal en función del tiempo, a diferencia de las termocuplas más alejadas de la fuente emisora de calor.

2. Una vez ocurrida la ignición, la temperatura del estrato aumenta sustancialmente más rápido, notándose el cambio abrupto en la curva. Esta situación tiene un pequeño desfase de tiempo a medida que el radio de control aumenta, producto de, entre otras cosas, la inercia térmica.

3. El calor transmitido por el heater al estrato vegetal tiene efectos hasta un cierto punto radial denominado espesor de penetración, característica propia de lechos porosos.

4. Dado un tiempo t menor a t_{ig}, la temperatura tiende a ser menor a medida que el flujo de radiación incidente lo es, independiente de la posición en la que se encuentre la termocupla al interior del estrato.

5. Para los experimentos donde no ocurre ignición, la temperatura tiende a estabilizarse alcanzando un equilibrio térmico, donde las pérdidas de calor se igualan al flujo incidente. No obstante, hay antecedentes de experimentos que se extendieron hasta 5.2 horas, logrando igniciones más allá de los 30 minutos esperados en este estudio.

6. Se recomienda la implementación de un mayor número de termocuplas dispuestas a distintas alturas, agregando una nueva dependencia de la temperatura, no sólo radial, también en función del eje z.

Luego de realizado este trabajo de memoria, surgen cada vez más interrogantes y adaptaciones al desarrollo experimental en un campo del área de investigación que aún es desconocido, siendo este un pequeño aporte a la comunidad científica. Resulta interesante el trabajar con nuevos valores de α_{fuel}, cuáles son los más representativos para la realidad chilena y si es posible relacionar este estudio con lo que se está viviendo en California. Se puede extender determinando el comportamiento de las variables estudiadas cuando el estrato vegetal presenta distintos niveles de contenido de humedad, acercando este estudio a lo que es posible encontrar realmente en bosques de pino. El cambio del tipo de estrato es otra arista a considerar, no sólo en base un porcentaje de superficies plantadas es posible hacer una elección, hay evidencia de *cortafuegos verdes*, plantaciones que por sus propiedades actúan como un cortafuegos natural, como lo describen en WWF (2014), buscando la reforestación de bosques autóctonos. Cabe mencionar lo controversial de las plantaciones de pino y eucaliptus por el alto impacto ambiental y social que generan.

Otra posible extensión a realizar consiste en variar las propiedades físicas de la fuente emisora de calor. Un heater con otra forma geométrica característica de las pavesas, cambiar las dimensiones e incluso variar el ángulo con respecto al recipiente podrían llegar a ser modificaciones que enriquezcan este estudio.

El objetivo busca comprender experimentalmente el comportamiento de las agujas de pino radiata frente a una pavesa, dando origen al fenómeno de propagación por spotting, pero esto tiene que servir en pos de realizar medidas cautelares que permitan la prevención. Siempre el mejor incendio es el que no se produce.

Bibliografía

Babrauskas, Vytenis (2002). Ignition of wood: a review of the state of the art. *Journal of Fire Protection Engineering*, 12(3), 163–189. 4.3.2, 5.5

Bond, William J; Woodward, F Ian; y Midgley, Guy F (2005). The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New phytologist*, 165(2), 525–538. 1.2.1

Boonmee, N. y Quintiere, J.G. (2002). Glowing and flaming autoignition of wood. *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(1), 289–296. 4.3.2, 5.1

Cary, Geoffrey J; Keane, Robert E; Gardner, Robert H; Lavorel, Sandra; Flannigan, Mike D; Davies, Ian D; Li, Chao; Lenihan, James M; Rupp, T Scott; y Mouillot, Florent (2006). Comparison of the sensitivity of landscape-fire-succession models to variation in terrain, fuel pattern, climate and weather. *Landscape ecology*, 21(1), 121–137. 2.3.2

Castillo, Miguel; Julio-Alvear, Guillermo; y Garfias, Roberto (2015). Current wildfire risk status and forecast in chile: Progress and future challenges. *Wildfire Hazards, Risks, and Disasters*, (pp. 59–75). 1.2.2.1, 1.1a, 1.1b

Caviedes, César N.; Carmagnani, Marcello A.; Johnson, John J.; y Drake, Paul W. (2017). Republic of Chile. 1.2.2.2

Çengel, Yunus A y Ghajar, Afshin J (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw-Hill Book Company. 2.1.3, 2.1.4

CONAF (2015). Brigadas de conaf trabajan en liquidar fuego subterráneo en reserva china muerta. https://goo.gl/6kgLHM. [Acceso Diciembre 2017]. 2.3.3.1

CONAF (2016). Catastro de los recursos vegetacionales nativos de chile y actualizaciones regionales del catastro. http://sit.conaf.cl/. [Acceso Diciembre 2017]. (document), 1.2.2.2, 1.1

CONAF (2017a). Causas según daño de incendios forestales 1987 -2017. http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/. [Acceso Diciembre 2017]. 1.2.2.1

CONAF (2017b). Resumen nacional ocurrencia (número) y daño (superficie afectada) por incendios forestales 1964 - 2017. http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/. [Acceso Diciembre 2017]. (document), 1.2.2.1, 1.2

Corporación Nacional Forestal (CONAF) (2015). Incendios forestales. http://www.altoincendios.cl/incendios-forestales/?que_significa. [Acceso Diciembre 2017]. 1.1

Dolan, Frances E (2001). Ashes and"the archive": The london fire of 1666, partisanship, and proof. *Journal of Medieval and Early Modern Studies*, 31(2), 379–408. 1.1

Drysdale, Dougal (2011). *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & Sons. 1.1

Eckert, Ernst Rudolf Georg y Drake Jr, Robert M (1959). *Introduction to heat and mass transfer*. McGraw-Hill Book Company. 2.1.1, 2.1.2

Fernandes, Paulo M y Rego, Francisco C (1998). A new method to estimate fuel surface area-to-volume ratio using water immersion. *International Journal of Wildland Fire*, 8(3), 121–128. 4.2.1, 4.4

Fernandez-Pello, A CARLOS (2011). On fire ignition. *Fire Safety Science*, 10, 25–42. 2.2.2, 2.2.3

Filkov, Alexander; Prohanov, Sergey; Mueller, Eric; Kasymov, Denis; Martynov, Pavel; El Houssami, Mohamad; Thomas, Jan; Skowronski, Nicholas; Butler, Bret; Gallagher, Michael; et al. (2017). Investigation of firebrand production during prescribed fires conducted in a pine forest. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(2), 3263–3270. 3.2.2.1

Fons, Wallace L (1946). Analysis of fire spread in light forest fuels. *Journal of Agricultural Research*, 72(3), 93–121. 2.3.1

Frandsen, William H (1971). Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and Flame*, 16(1), 9–16. 2.3.1

Gobierno de Chile (2017a). Resultados censo 2017. http://www.censo2017.cl/. [Acceso Diciembre 2017]. 1.2.2.2

Gobierno de Chile (2017b). Specialized eu team: "chile's forest fire is unprecedented and its impact is on a planetary scale". https://goo.gl/qnD82M. [Acceso Diciembre 2017]. 1.1

Greenpeace (2015). *El verano que no queremos que ocurra*. Technical report, Madrid. 1.2.1

Grubbs, Frank E (1969). Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics*, 11(1), 1–21. 2.5

Hernández, N.; Fuentes, A.; Consalvi, J. L.; y Elicer-Cortés, J.C (2017). Spontaneous Ignition of Wildland Fuel By Idealized Firebrands. 2.2.5, 4.1.2

Incropera, Frank P y DeWitt, David P (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación. 2.1.1, 2.1.4

James, Charles D (2002). The 1923 tokyo earthquake and fire. *Univ. of California, Berkeley, CA*. 1.1

Keane, Robert E (2015). *Wildland fuel fundamentals and applications*. Springer. (document), 2.4.1, 2.5, 2.4.2, 2.4.3, 2.4.4, 4.2.2

Manzello, Samuel L; Cleary, Thomas G; Shields, John R; Maranghides, Alexander; Mell, William; y Yang, Jiann C (2008). Experimental investigation of firebrands: generation and ignition of fuel beds. *Fire Safety Journal*, 43(3), 226–233. 3.2.2.1

Manzello, Samuel L; Cleary, Thomas G; Shields, John R; y Yang, Jiann C (2006a). On the ignition of fuel beds by firebrands. *Fire and Materials*, 30(1), 77–87. 3.2.2.1

Manzello, Samuel L; Maranghides, Alexander; Mell, William E; Cleary, Thomas G; y Yang, Jiann C (2006b). Firebrand production from burning vegetation. *Forest Ecology and Management*, 234(1), S119. 3.2.2.1

Manzello, Samuel L; Maranghides, Alexander; Shields, John R; Mell, William E; Hayashi, Yoshihiko; y Nii, Daisaku (2009). Mass and size distribution of firebrands generated from burning korean pine (pinus koraiensis) trees. *Fire and Materials*, 33(1), 21–31. (document), 2.3, 2.3.3.4, 3.2.2.1

McAllister, S y Finney, M (2017). Autoignition of wood under combined convective and radiative heating. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(2), 3073–3080. 5.1

McAllister, S; Grenfell, I; Hadlow, A; Jolly, WM; Finney, M; y Cohen, J (2012). Piloted ignition of live forest fuels. *Fire Safety Journal*, 51, 133–142. 5.1

Mindykowski, P; Fuentes, A; Consalvi, JL; y Porterie, B (2011). Piloted ignition of wildland fuels. *Fire Safety Journal*, 46(1), 34–40. 4.2.3, 5.1, 5.2

Modest, Michael F (2013). *Radiative heat transfer*. Academic press, Elsevier. 4.1.1

Mowrer, Frederick W (2004). Fundamentals of the fire hazards of materials. *Handbook of Building Materials for Fire Protection*. 2.2.1, 2.2.2, 2.2.4.2, 2.2.6.1, 2.2.6.2

Niinemets, Ülo; Ellsworth, David S; Lukjanova, Aljona; y Tobias, Mari (2002). Dependence of needle architecture and chemical composition on canopy light availability in three north american pinus species with contrasting needle length. *Tree physiology*, 22(11), 747–761. 4.2.1, 4.4

Niioka, Takashi; Takahashi, Mamoru; y Izumikawa, Muneo (1981). Gas-phase ignition of a solid fuel in a hot stagnation-point flow. In *Symposium (International) on Combustion*, volume 18 (pp. 741–747).: Elsevier. 2.2.4.2

Olmo, J Madrigal; Ruiz, JA; Planelles, R; y Hernando, Carmen (2013). Characterization of wildland-urban interfaces for fire prevention in the province of valencia (spain). *Forest Systems*, 22(2), 249–254. 1.1

Ottmar, Roger y Andreu, Anne (2007). Litter and duff bulk densities in the southern united states. *Final report, JFSP project*, (pp. 04–2). (document), 4.2.4, 4.7, 4.8

Purcell, Cedric (2017). *La guerra con España y el bombardeo a Valparaíso, 1865-1866*. RiL Editores. 1.1

Quintiere, James G (2006). *Fundamentals of fire phenomena*, chapter 7. Wiley Online Library. 2.2.2, 2.2.5, 2.2.6.1

Rothermel, Richard C et al. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. 2.4.3

Safelincs Ltd (2016). Information about the fire triangle/tetrahedron and combustion. https://www.firesafe.org.uk/information-about-the-fire-triangletetrahedron-and-combustion/. [Acceso Diciembre 2017]. 2.3.2

Schuette, Robert D (1965). *Preparing reproducible pine needle fuel beds*, volume 36. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture. 4.2.4

Shoub, H y Bender, EW (1964). *Radiant ignition of wall finish materials in a small home*. NBS Report 8172. 5.3

Simeoni, Albert; Thomas, JC; Bartoli, Pauline; Borowieck, P; Reszka, P; Colella, F; Santoni, Paul-Antoine; y Torero, José Luis (2012). Flammability studies for wildland and wildland–urban interface fires applied to pine needles and solid polymers. *Fire safety journal*, 54, 203–217. 4.2.1, 4.4

Sugihara, Neil G (2006). *Fire in California's ecosystems*. Univ of California Press. (document), 2.3.1, 2.1, 2.3.3.4

Taylor, J. (1997). *Introduction to Error Analysis, the Study of Uncertainties in Physical Measurements, 2nd Edition*, chapter 4. University Science Books: New York. 4.4, 4.4

Tihay, Virginie; Morandini, Frédéric; Santoni, Paul-Antoine; Perez-Ramirez, Yolanda; y Barboni, Toussaint (2014). Combustion of forest litters under slope conditions: Burning rate, heat release rate, convective and radiant fractions for different loads. *Combustion and Flame*, 161(12), 3237–3248. 4.2.1, 4.4

Tihay, Virginie; Simeoni, Albert; Santoni, Paul-Antoine; Rossi, Lucile; Garo, Jean-Pierre; y Vantelon, Jean-Pierre (2009). Experimental study of laminar flames obtained by the homogenization of three forest fuels. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(3), 488–501. 4.2.2, 4.2.2

Torero, José (2016). *Flaming Ignition of Solid Fuels*, (pp. 633–661). Springer New York: New York, NY. (document), 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.1, 2.2.4.1, 2.2.4.2, 2.2.5, 2.2.6.1, 2.2.6.3, 5.3, 5.5

Wagner, CE Van (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(1), 23–34. 2.3.3.3

Walpole, Ronald E; Myers, Raymond H; Myers, Sharon L; y Keying, E Ye (2016). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists, MyStatLab*. Pearson Higher Ed. 2.5, 2.5, 2.5

WWF (2014). Restaurar los bosques hoy es la clave para evitar los incendios de mañana. https://www.wwf.es/?29740/Restaurar-los-bosques-hoy-es-la-clave-para-evitar-los-incendios-de-maana. [Acceso Diciembre 2017]. 6