

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL ÓPTICO
PARA EL ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN DE MUESTRAS DE
EUCALIPTUS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS
NO INTRUSIVAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR: MATÍAS AHUMADA TOLEDO

PROFESOR GUÍA: FELIPE ESCUDERO BARROS

PROFESOR CORREFERENTE: GONZALO SEVERINO LÓPEZ

SANTIAGO DE CHILE, JUNIO DE 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Implementación de un montaje experimental óptico para el estudio de la combustión de muestras de eucaliptus mediante la aplicación de técnicas no intrusivas.

Nombre del candidato(a): Matías Gabriel Ahumada Toledo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Felipe Escudero Barros, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 24-06-2025

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23-06-2025

Firma:

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

Tabla de contenido

Introducción.....	4
1. Problema de investigación	7
2. Objetivos	11
2.1. Objetivo General.....	11
2.2. Objetivos Específicos	11
3. Marco teórico.....	12
3.1. Conceptos relevantes	12
3.2. Llama de difusión.....	16
3.2.1. Llama de difusión laminar y turbulenta	16
3.3. Hollín	17
3.4. Temperatura	19
3.5. Mecanismo de Ignición.....	22
3.5.1. Ignición pilotada	23
3.5.2. Cantidad de energía requerida para la ignición	23
3.5.3. Volumen de inducción de la ignición en la muestra.....	24
3.6. Ecuación de Transferencia Radiativa.....	25
3.6.1. Ley de Bouguer-Lambert-Beer	26
3.6.2. Ecuación integral de Abel	27
3.6.3. Fracción en volumen de hollín	29
3.7. Técnicas ópticas para la obtención de parámetros	30
3.7.1. Line-Of-Sight Attenuation (LOSA).....	31
3.7.2. Modulated Absorption/Emission (MAE).....	33
3.8. Absorción radiativa y Emisión radiativa	37
3.9. Deconvolución	38
3.9.1. Método Onion-Peeling.....	40
3.9.2. Regularización de Tikhonov	42
4. Montaje experimental.....	44
4.1. Fuente de luz	46
4.2. Lentes acromáticos.....	47

4.3.	Cámara.....	47
4.4.	Quemador.....	48
4.5.	Flujo de aire.....	49
4.6.	Muestra.....	51
5.	Análisis y Resultados.....	54
5.1.	Condiciones experimentales.....	54
5.2.	Procedimiento experimental.....	54
5.2.1.	Preparación de las muestras.....	54
5.2.2.	Configuración de cámara y software.....	55
5.2.3.	Ignición de la muestra.....	57
5.2.4.	Descripción del experimento.....	57
5.3.	Procesamiento de las mediciones Tamaño N°1 y Tamaño N°2.....	60
5.3.1.	Coefficiente de extinción.....	64
5.3.2.	Fracción en volumen de hollín para muestras Tamaño N°1.....	65
5.3.3.	Fracción en volumen de hollín para muestras Tamaño N°2.....	68
5.4.	Validación.....	71
5.5.	Resultados de la experimentación.....	72
5.6.	Trabajo futuro.....	73
6.	Conclusiones.....	76
7.	Referencias.....	78

Introducción

Un incendio forestal se define como una liberación descontrolada de energía, la cual se propaga velozmente pudiendo destruir todo lo que encuentre a su paso, siendo su principal combustible el vegetal. En base a datos entregados por CONAF (2024), el 99,7% de los incendios tienen su origen en la manipulación descuidada o negligente en cuanto a fuentes de calor, o por prácticas del tipo agrícola, o de manera intencional, pudiendo ser incluso delictivas.

Alrededor del mundo el caso no es diferente, por ejemplo, en Bélgica se ha comprobado que anualmente se queman 3 millones de hectáreas más con respecto a dos décadas atrás. Según lo señalado por Ortiz (2022), desde el año 2001 los incendios forestales en el país se han incrementado 2,45 veces, superando el promedio mundial; en el año 2012, se perdieron 48 mil hectáreas por el fuego, y el 2017 fueron 67 mil, siendo los territorios de La Araucanía y Biobío los más afectados por este fenómeno. Estas perturbaciones claramente demuestran la necesidad de mejorar el manejo forestal, ya que su causa se atribuye al uso del fuego por los seres humanos, el cual interactúa con las temperaturas extremas y la sequía que invade los bosques. Fenómenos como la deforestación y la degradación impactan a los bosques de una manera adversa, ya que quedan propensos a los incendios tras las condiciones de clima seco que se generan. Con esto, el cambio climático aumenta cada vez más en términos de costos y de intensidad. Esta incidencia en el planeta se da ya que los incendios forestales liberan cantidades exorbitantes de carbono a la atmósfera.

Este fenómeno de los incendios forestales hasta el día de hoy tiene una enorme ocurrencia en Chile, más aún en el último tiempo dado por factores como el cambio climático, el calentamiento global, sequías, etc. Un ejemplo en el cual se puede dimensionar la gravedad que tienen estos fenómenos, es el ocurrido en Valparaíso en el año 2017 llegado el verano, en el cual salieron damnificadas más de 6 mil personas y más de 180 mil hectáreas fueron consumidas por el fuego (Núñez, 2022). Acorde a CONAF (2025), según los estudios realizados del Sistema de Información Digital para Control de Operaciones (SIDCO), los períodos del 2016-2017 y del 2022-2023 fueron los de mayor envergadura, con un número de incendios de 5.274 y 6.982 respectivamente, y a su vez con 570.197 [ha] y 429.123 [ha] respectivamente de superficie afectada.

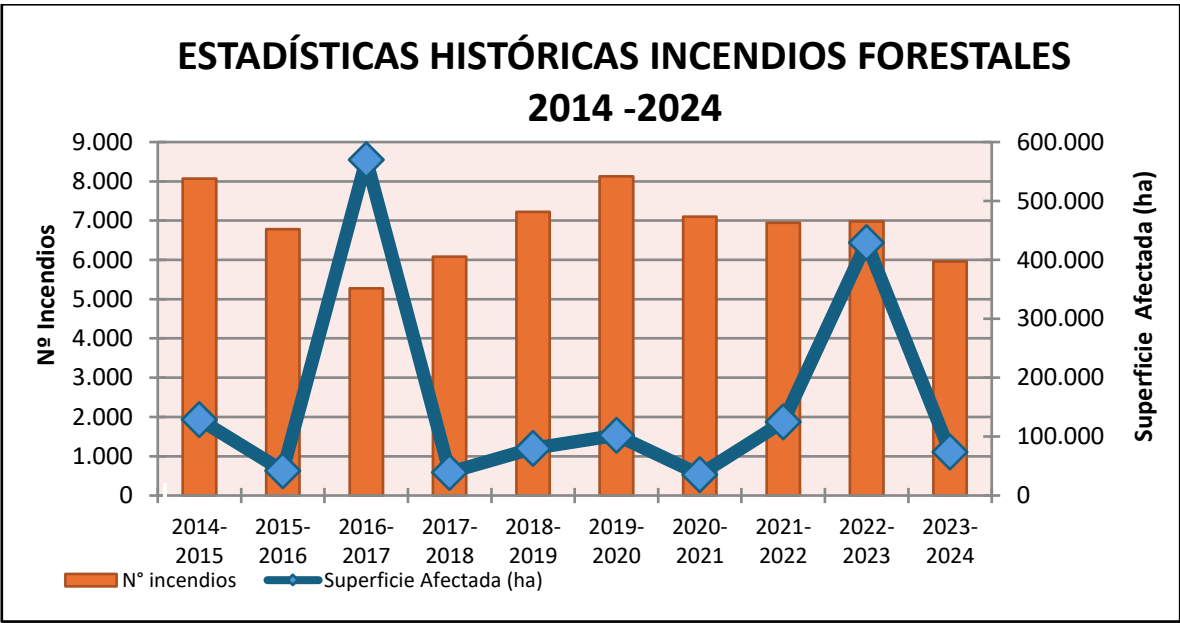


Figura 1: Estadísticas de los Incendios Forestales ocurridos en Chile durante los años 2014 al 2024.

Fuente: CONAF, Gerencia protección contra incendios forestales.

No cabe dudas de que los incendios forestales son un fenómeno que repercute en el país hasta el día de hoy, teniendo impactos negativos en los hábitats, la biodiversidad, la contaminación atmosférica, la degradación del suelo, entre otros. El caso más reciente fue el pasado mes de febrero de 2024 en la zona centro-sur del país, afectando a los municipios de Viña del Mar, Quilpué, Limache y Villa Alemana con más de 8.500 hectáreas quemadas (Martínez et al., 2024).

La probabilidad de ocurrencia de un incendio y su consecuente propagación tienen una gran dependencia de la cantidad de combustible disponible, lo inflamable que sea y la forma en que se encuentre distribuido, siendo por estas razones que las zonas centro y sur del país son las más afectadas por los incendios forestales, al poseer una cantidad de vegetación alta al igual que las actividades forestales. Esta vegetación en el verano se seca, considerando las altas temperaturas que hay, en ocasiones superiores a los 35°, lo cual convierte esta vegetación en un combustible ideal para los incendios, por esto resulta interesante experimentar con estos combustibles de tipo silvestres mediante un modelamiento adaptado en un montaje experimental y generar una llama de difusión laminar para aplicar técnicas láser no intrusivas en ella.

1. Problema de investigación

Los incendios forestales son fenómenos que han ocurrido numerosas veces en las últimas décadas, incrementando cada vez las áreas afectadas y causando un severo daño traducido en pérdidas humanas, ecológicas y económicas en áreas urbanas e industrias agrícolas y forestales, y áreas protegidas. “Históricamente, la ocurrencia de incendios forestales en el centro-sur de Chile fue más común durante la estación cálida y seca del verano (enero-marzo), aunque en las últimas décadas se han registrado incendios durante todo el año en muchas partes del área de estudio [...] Las regiones del Bío-Bío y la Araucanía experimentan el mayor número de incendios anualmente” (McWethy et. al, 2018).

La propagación de un incendio forestal es un proceso bastante complejo que abarca kilómetros de distancia, lo cual hace que su estudio a una escala real sea algo difícil y costoso. Una comprensión satisfactoria de este fenómeno implica resolver las ecuaciones de la dinámica de la llama junto con los procesos termoquímicos asociados a la degradación térmica de los combustibles sólidos y la oxidación de los combustibles gaseosos. Este enfoque es difícil de implementar principalmente debido a la falta de una comprensión completa de la cinética de formación y oxidación del hollín, y también con relación a la estructura turbulenta de las llamas, en donde lo realizado por Peters (1984) es una herramienta útil en cuanto al estudio de la llama laminar. En vista de estos problemas, la comunidad de combustión utiliza métodos semiempíricos para modelar llamas de mediana y gran escala de combustibles líquidos en términos de su velocidad de combustión, diámetro, altura

de llama, emisividad, etc. Lo anterior es desarrollado mediante quemadores para analizar muestras de pequeña escala, con condiciones de borde controladas, de manera similar a lo que se ha implementado en el presente trabajo.

Diversas investigaciones han abordado este problema. Por ejemplo, Tihay et al. (2009), los cuales ejecutaron una experimentación de llamas laminares obtenidas por homogeneización de tres combustibles forestales; además, mecanismos químicos para la combustión de gases liberados por combustibles forestales triturados; por último, el desarrollo de un modelo de ámbito global para la combustión de mezclas de gases liberadas de combustibles forestales. También, Muñoz-Feutch et al. (2014) hicieron mediciones de fracción de volumen de hollín en llamas producidas con capas de combustible forestal, en donde la geometría de llama axisimétrica observada en la etapa laminar permite la aplicación de una técnica de deconvolución junto con un método de regularización de Tikhonov para obtener perfiles radiales locales y fracciones de volumen de hollín integradas.

Junto con lo anterior, Jenkins y Hanson desarrollaron la técnica de absorción/emisión modulada (MAE) para explorar una llama unidimensional de etileno/aire premezclado establecida sobre un quemador McKenna como menciona Bonnetty et al. (2015). En estos experimentos utilizan la emisión y absorción combinadas en dos longitudes de onda: 830 y 1300 nm, proporcionando una mejor sensibilidad a la temperatura y evadiendo las incertidumbres en el índice de refracción del hollín en el infrarrojo, dependiente de la longitud de onda, midiendo la emisividad de manera directa, eliminando así la dependencia de un modelo de

índice de refracción tras obtener la temperatura (Jenkins & Hanson, 2001).

En consecuencia, en el presente estudio se busca proporcionar un enfoque modificado de las técnicas anteriores con el diseño de un quemador estándar para combustibles silvestres. Con esta configuración es posible la formación de llamas de difusión laminar axisimétricas a partir de combustibles vegetales, las cuales se pueden analizar utilizando técnicas no intrusivas, buscando estudiar llamas de biomasa y mejorar la comprensión de la producción del hollín como lo realizado por Fuentes et al. (2007), para así establecer un modelamiento experimental a una escala óptima para realizar estudios de un incendio forestal de escala real, siguiendo la metodología y el montaje experimental de Severino et al. (2020).

Chile posee amplias plantaciones de Eucaliptus, predominantemente de las especies *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*. Estas variedades se destacan por su alta productividad, favorecida por las condiciones climáticas óptimas de las regiones centro-sur del país. Además, el Eucaliptus es una de las especies forestales más cultivadas a nivel nacional, lo que facilita su acceso y reduce los costos asociados a su adquisición y transporte en comparación con otras especies menos comunes (Barros Asenjo, 2013). En este contexto, para la presente investigación se empleó *Eucalyptus globulus*, obtenido específicamente del bosque Tranque de la Luz, ubicado en la región de Valparaíso.

Una vez definido el tema que será investigado, para apoyar el camino de este proceso surgen ciertas preguntas a modo de orientación, mediante las cuales sea

posible entender lo que se quiere hacer y de qué trata la problemática. Con esto, se tienen las siguientes preguntas:

- ¿Es posible el montaje de un equipamiento experimental que permita el estudio de llamas de biomasa?
- Mediante el quemador, ¿es posible llevar a cabo la producción de llamas de difusión laminar a partir de hojas de Eucaliptus permitiendo la aplicación de diagnósticos y técnicas no intrusivas?
- ¿Se puede generar una llama que mantenga una estabilidad suficiente para ser analizada con este montaje experimental?

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Producir y caracterizar llamas de difusión laminar y axisimétricas con un quemador estándar para combustibles silvestres, con el fin de modelar a escala de laboratorio la geometría de la llama generada en incendios forestales para determinar propiedades del hollín utilizando métodos no intrusivos.

2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar una configuración experimental capaz de producir llamas a pequeña escala a partir de muestras de hojas de Eucaliptus de tamaño reducido procesadas de manera estandarizada.
- Llevar a cabo estudios y diagnósticos ópticos de llamas estables generadas por el quemador mediante la utilización de la técnica Line-Of-Sight Attenuation (LOSA).
- Determinar la fracción en volumen de hollín en llamas de Eucaliptus.

3. Marco teórico

Como fue mencionado anteriormente, el problema de investigación consta de la adaptación de una llama como la generada en un incendio forestal, a una escala que permita ejecutar estudios mediante técnicas de láser no intrusivas, con las cuales sea posible establecer un análisis de las condiciones volumétricas y superficiales de la llama, así como de la fracción en volumen del hollín en llamas de biomasa.

3.1. Conceptos relevantes

- **Absorción:** Se refiere a la recepción de energía y describe el proceso por el cual la energía de una onda se transfiere a la materia por la que viaja.
- **Albedo:** Es un coeficiente que mide la reflectividad de una superficie. Se define como la proporción de la radiación incidente que una superficie refleja en lugar de absorber. Va entre 0 y 1, en donde un valor de 0 indica que hay una absorción total de la radiación incidente y 1 corresponde a que hay una total reflexión de la radiación incidente.
- **Axisimétrica:** Estructuras que son rotacionalmente simétricas al tomar como referencia uno de los ejes.
- **Biomasa:** Es la unidad de materia orgánica que se utiliza como fuente de energía. Esta materia puede ser proveniente de animales o de plantas, incluyendo residuos orgánicos, y posee diferentes ventajas tales como: se encuentra en grandes

cantidades; no tiene un mayor impacto al efecto invernadero; es económica; es una fuente de energía renovable; segura y limpia.

- **Combustibles silvestres:** Fuentes que sirven y facilitan generación de calor que surgen tras su crecimiento en el campo o selva de manera natural y su posterior secado. En esta experimentación, por ejemplo, se utilizan combustibles en base a hojas de Eucaliptus.
- **Combustión:** Son un tipo de reacción redox, es decir, una reacción de reducción-oxidación en la cual un reactivo se oxida (pierde electrones), mientras que el otro se reduce (gana electrones). Se produce luz y calor en la mayoría de los casos, y tiene una ocurrencia considerablemente rápida.
- **Emisión:** Es el espectro de longitudes de onda de la luz emitida por los átomos y moléculas al realizar una transición entre dos estados de energía.
- **Espectro:** Distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda, la energía o la temperatura.
- **Espectroscopia:** Se define como el estudio de la interacción entre las ondas electromagnéticas y la materia, pudiéndose obtener un análisis de la estructura, propiedades y composición de una muestra en estudio, mediante interacciones tales como: absorción, emisión, dispersión, reflexión, transmisión, difracción.
- **Humedad:** Es un indicador de la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Se conoce de esta forma al agua que se encuentra impregnando un cuerpo o al vapor de agua presente en la atmósfera.
- **Ignición:** Proceso químico que puede iniciarse cuando una sustancia inflamable

entra en contacto con una fuente de energía, como una chispa eléctrica que puede provocar la combustión de un gas, y que sigue ardiendo por sí mismo sin necesidad de la causa inicial. Por ello, la ignición se utiliza en varios mecanismos para iniciar procesos que dependen de la energía térmica para su funcionamiento.

- **Inflamable:** Facilidad de algo para encenderse de manera fácil y que tiene un bajo tiempo para desprender llamas.
- **Intensidad radiativa:** Consiste en una medición de la cantidad de radiación térmica que es transmitida en una determinada dirección, la cual permite realizar una caracterización de la distribución espectral de la radiación emitida por una superficie.
- **Longitud de onda:** Es la distancia que existe entre dos puntos de luz que aparecen de manera consecutiva y que están en fase. Esta determina muchas propiedades fundamentales de la luz, como su color en el espectro visible y su capacidad para interactuar con la materia.
- **Oxidantes fotoquímicos:** La oxidación se define como la combinación de oxígeno con otras sustancias. Al ser fotoquímicas, son sustancias contaminantes que se forman por gases de óxidos de nitrógeno y combustible que de manera incompleta se someten a un proceso de combustión.
- **Pirólisis:** Degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, las cuales se descomponen mediante calor sin producirse la combustión.
- **Pirometría:** Se conoce como el arte de medir las variaciones producidas por la acción del fuego en los cuerpos sólidos, o para medir las más elevadas temperaturas.

- **Portamuestras poroso:** Consiste en un espacio cilíndrico perforado (poroso) en el cual es posible depositar el combustible silvestre que será sometido a la combustión. Su material de fabricación es espuma de níquel, y su diámetro es de 3,0 cm.
- **Quemador:** Aquel dispositivo que gracias a sus características facilita la mezcla entre un combustible y un agente oxidante, produciendo una combustión.
- **Técnicas intrusivas:** Son aquellas que permiten la recolección de datos y mediciones mediante una intervención directa en el proceso que se encuentra en estudio, es decir, la interacción ocurre físicamente con el medio. Por ejemplo, las termocuplas.
- **Técnicas no intrusivas:** Son aquellos equipos, dispositivos o máquinas que poseen una fuente que emite radiación electromagnética con la cual es posible llevar a cabo la captura de imágenes, en donde mediante la utilización de un sistema informático y distintas herramientas, se hace posible realizar estudios y mediciones de la llama.
- **Trigger:** Es un modo de captura de imágenes que permite tomar fotografías de la llama en el momento exacto en que el led esté encendido y apagado.
- **Tomografía:** Consiste en la obtención de imágenes 3D mediante una serie de capturas en 2D, las cuales son tomadas desde diferentes ángulos alrededor de un cuerpo en estudio. Permite la reconstrucción tridimensional a través de las proyecciones realizadas a un objeto.
- **Transmisividad:** Es una medida de la capacidad que tiene un medio para permitir el paso de la luz (radiación), cuantificando la radiación que incide y la radiación que

es absorbida o reflejada.

3.2. Llama de difusión

Una llama de difusión se define como aquella en que el combustible y el oxidante se encuentran separados inicialmente, y los procesos tanto de mezcla como de la reacción química ocurren simultáneamente.

En general, es posible encontrar dos clasificaciones de llamas dependiendo del momento en que se mezcla el combustible gaseoso y el oxidante. Se le dice llama premezclada cuando el aire y el gas se mezclan antes de la zona de combustión, por ejemplo, como es el caso de llamas de quemadores a gas en cocinas residenciales; por otro lado, si la mezcla ocurre en el momento y dentro de la zona de combustión se le denomina llama no-premezclada, o en su defecto, llama de difusión, debido a que el transporte de combustible y oxidante a la zona de reacción se produce principalmente por difusión, según lo señalado por McAllister et al. (2011).

3.2.1. Llama de difusión laminar y turbulenta

Es posible definir la naturaleza de la llama de dos maneras según el régimen en el cual se encuentre, laminar o turbulenta. Para esto, es necesario conocer el valor del número adimensional de Reynolds, definido por:

$$Re = \frac{v \cdot L_c}{\nu} \quad (1)$$

Donde v es la velocidad, L_c es un largo característico dependiente de la geometría o configuración del problema tratado y ν es la viscosidad cinemática.

Al estudiar un flujo, lo primero que se debe hacer es estimar el número de Reynolds. Si el valor de Re es muy bajo, indica un movimiento lento y viscoso, donde los efectos de inercia son insignificantes. Valores moderados de Re indican un flujo laminar, que se caracteriza por variaciones suaves. En cambio, valores altos de Re suelen asociarse con un flujo turbulento, que presenta fuertes fluctuaciones aleatorias de alta frecuencia sobre un flujo medio que también muestra variaciones suaves a lo largo del tiempo (White, 2004).

Por lo anterior, una llama de difusión laminar es posible considerarla como estable y valiosa de indagar, a pesar de que en el contexto de incendios las llamas turbulentas son las predominantes, se hace útil estudiar una llama de difusión laminar, dado que al ser esta una llama con mayor estabilidad, se pueden caracterizar con mayor precisión los parámetros y las variables que inciden en la combustión.

3.3. Hollín

Se forma por las pequeñas partículas de carbono que resultan de una combustión

de combustibles fósiles incompleta. La emisión de radiación de hollín procedente de las llamas presenta características espectrales que han sido estudiadas durante décadas.

Las nanopartículas de hollín son nocivas independientemente de la fuente de emisión utilizada, en este caso, el hollín originado por los incendios, lo cual constituye una amenaza para la salud humana. Las partículas generadas sufren rápidos cambios en su tamaño, forma y concentración, lo cual brinda una complejidad importante al momento de llevar a cabo investigaciones experimentales y analíticas. Para cumplir las futuras normas de bajas emisiones, dada la necesidad actual del planeta, la comprensión y caracterización del hollín será crucial, como señala Niessner (2014).

Las partículas de hollín originadas durante los procesos de combustión tienen una incidencia crucial tanto en el rendimiento como en la durabilidad de diversos sistemas de ingeniería, por ejemplo, las turbinas de gas y los motores diésel. Estas implicaciones del tipo tecnológicas y también ambientales dan paso a la investigación de la teoría y la literatura para lograr una mayor comprensión de los factores que repercuten de manera significativa en la formación de hollín en las llamas. Lo anterior hace surgir el interés de estudiar el tamaño, la concentración y la distribución espacial del hollín, junto con la temperatura mediante técnicas no intrusivas (Hadeef et al., 2013). Por esto, hay variados estudios y técnicas que profundizan en el análisis del hollín, centrándose en su formación, nucleación y crecimiento, así como en las variables que influyen en él. El hollín emite radiación

térmica, lo que hace que las llamas tengan un color anaranjado debido a la incandescencia de las partículas.

Aprovechando la intensidad del color de la llama, es posible obtener diferentes variables utilizando diagnósticos ópticos, como la fracción de volumen de hollín y la temperatura de la llama. Por ejemplo, la técnica LOSA (Line-Of-Sight Attenuation), mediante la cual es posible obtener una relación entre el coeficiente de absorción del hollín k_λ y la fracción en volumen de hollín f_s . Luego, mediante la técnica MAE (Modulated Absorption/Emission) se puede obtener una relación entre el coeficiente de extinción k_{ext} como una aproximación del coeficiente local de absorción k_{abs} , con lo cual se obtiene la fracción en volumen de hollín f_s mencionada anteriormente, y luego la temperatura del hollín de la llama T_s . Ambos métodos serán profundizados más adelante.

3.4. Temperatura

La temperatura es un parámetro crucial en el estudio de la combustión, de las llamas de biomasa y del hollín. Indica el nivel de movimiento o energía cinética de las partículas que conforman una sustancia, teniendo una incidencia clave tanto en la eficiencia como en el rendimiento de las reacciones de combustión. Una correcta comprensión de la temperatura, así como del control de esta en las mediciones, da paso a una optimización del proceso de combustión logrando los resultados deseados, teniendo en cuenta que este fenómeno también tiene una repercusión

en la velocidad en que se produce la reacción en cuestión. Una alta temperatura conlleva una velocidad de reacción más rápida, algo crucial a la hora de diseñar sistemas de combustión que cumplan ciertos estándares de eficiencia, así como de la utilización ideal del combustible, todo con el objetivo de obtener un grado de conversión del combustible utilizado en energía útil para los procesos de conversión de energía (TechieScience Core SME, 2022).

Por lo anterior, comprender los efectos de la temperatura en la combustión es esencial para diversas aplicaciones, incluidas las operaciones de calderas, la combustión de combustible en motores y los procesos industriales. Controlando y optimizando la temperatura, es posible lograr una combustión eficiente y limpia, maximizando al mismo tiempo la producción de energía.

Una de las dificultades que presenta la temperatura, es su método de medición. Para ello existen diversos mecanismos, entre los cuales podemos encontrar las termocuplas, las cuales son instrumentos invasivos, ya que es necesario colocar físicamente el instrumento donde se encuentra la llama para realizar las mediciones de la temperatura. También, estas tienen una vida útil breve y un tiempo de respuesta extenso. Por otro lado, existe la obtención de la temperatura mediante mecanismos o métodos no invasivos, como por ejemplo, la pirometría.

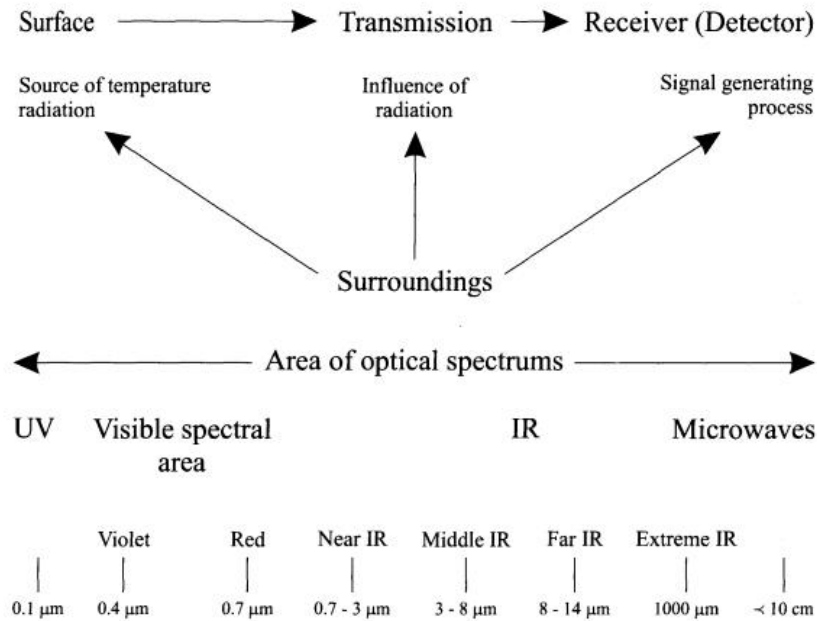


Figura 2: Sistematización de los rangos espectrales de la pirometría en las mediciones ópticas, en donde hay una emisión radiativa y una recepción de la señal que es procesada.

Fuente: Glückert & Schmidt (2001).

A pesar de que existen diversos métodos en diferentes rangos espectrales, el fundamento de la pirometría sigue siendo el mismo: se mide la radiación emitida por el objeto en estudio a través de varios canales con características espectrales distintas. La emisividad se modela en función de la longitud de onda, utilizando parámetros ajustables obtenidos de manera empírica. Esto resulta en un sistema de ecuaciones cuya solución proporciona tanto la temperatura del objeto como los parámetros de la función de emisividad. Con esto, se detecta la radiación térmica emitida y se convierte en una señal eléctrica, la cual a su vez es traducida en una lectura de la temperatura.

La pirometría tiene sus fundamentos en la ley de Stefan-Boltzmann, la cual señala que la radiación térmica que emite un cuerpo negro es proporcional a la temperatura absoluta (medida en Kelvin) elevada a la cuarta, expresándose de la siguiente manera:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

Donde **E** es la energía radiada por unidad de área, **T** es la temperatura absoluta del cuerpo en estudio y **σ** es la constante de Stefan-Boltzmann definida como:

$$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad (3)$$

3.5. Mecanismo de Ignición

La ignición es el mecanismo que induce una reacción de combustión y se caracteriza por un aumento acelerado de la temperatura de la especie. En términos simples, se genera una reacción química entre un material oxidable y el oxígeno, haciendo que se libere energía y que generalmente aparezca una llama. Una comprensión completa de la ignición es vital en una amplia variedad de procesos de combustión, como por ejemplo, el diseño de dispositivos de combustión, y también para la prevención de incendios.

La ignición de un material utilizado como combustible, es posible clasificarlo de dos

formas: por un lado, se tiene la ignición espontánea, o llamada también autoignición, la cual ocurre mediante el autocalentamiento de los reactivos, en donde se forma una reacción química que genera más calor del que el material puede expeler; de otra manera, se tiene la ignición pilotada, la cual ocurre con la ayuda de una fuente de ignición (energía) que calienta la mezcla a una alta temperatura, manteniéndose la combustión del material una vez removida la fuente (McAllister et al., 2011).

3.5.1. Ignición pilotada

Como fue señalado, se suministra mediante la fuente de ignición la energía necesaria para que el material se someta a la reacción de combustión. El encendido pilotado puede iniciarse por muchos medios, como una chispa, fricción, resistencia eléctrica o un rayo láser. Los materiales que son expuestos a la fuente de calor comienzan a incrementar su temperatura. Dependiendo de qué tan inflamable es el material, esta etapa puede tener una duración variable. Algunos materiales son capaces de alcanzar su punto de ignición rápidamente, mientras que otros requieren de más tiempo para calentarse lo suficiente antes de que puedan quemarse.

3.5.2. Cantidad de energía requerida para la ignición

El estudio de la energía requerida para iniciar la ignición, es posible modelarla siguiendo lo indicado por McAllister et al. (2011) con la siguiente ecuación de conservación de la energía:

$$\rho C_p V \frac{\partial T}{\partial t} = -\dot{Q}_{p\acute{e}rdida} + \hat{r}_{combustible} \hat{Q}_c V + \dot{Q}_{piloto} \quad (4)$$

Donde ρ es la densidad, C_p es el calor específico del material, $\hat{r}_{combustible}$ es la tasa de consumo de combustible $\left(\frac{kmol}{m^3s}\right)$, \hat{Q}_c es el calor de combustión $\left(\frac{J}{kmol}\right)$, V es el volumen del volumen de control en estudio, \dot{Q}_{piloto} es la tasa de fuente de energía de la chispa de ignición (medida en $\frac{J}{s}$), y $\dot{Q}_{p\acute{e}rdida}$ es la tasa de pérdida de calor, en donde se incluye el calor perdido en los electrodos por la conducción y también la transferencia de calor al entorno por convección. Considerando que en el proceso de ignición el calor producido por la reacción de combustión es despreciable, entonces $\hat{r}_{combustible} \hat{Q}_c V = 0$. Integrando la ecuación (4) en el período en que ocurre la ignición se tiene:

$$E_{ignición} = \rho C_p V (T_f - T_i) + \dot{Q}_{p\acute{e}rdida} \quad (5)$$

Donde la energía de ignición es $E_{ignición} = \int \dot{Q}_{piloto} dt$, T_f es la temperatura de la llama y T_i es la temperatura inicial del reactivo.

3.5.3. Volumen de inducción de la ignición en la muestra

Junto con la cantidad de energía necesaria, y sabiendo que para la inducción de la ignición del combustible silvestre se utiliza alcohol 95% desnaturalizado, se debe

conocer el volumen que es necesario verter en la muestra para lograr una ignición visible y consistente, que permita la formación de una llama laminar, axisimétrica, variable en el tiempo y sin mezcla previa. Con los trabajos llevados a cabo por Muñoz-Feutch et al. (2014), y luego Severino et al. (2020), se define que con un volumen de 0,3 ml de etanol vertido sobre muestras de combustibles forestales de tamaño reducido es posible lograr la ignición, considerando un tamaño de la muestra entre 0,35 mm y 1 mm, y también un tamaño del diámetro del portamuestras entre 3,0 cm y 3,5 cm.

3.6. Ecuación de Transferencia Radiativa

La Ecuación de Transferencia Radiativa (RTE, por su sigla en inglés), describe a la ecuación generalizada de transferencia de calor por radiación en un medio, la cual permite considerar la geometría del problema e incorporar en el estudio los fenómenos de absorción, emisión, y particularmente la dispersión que se encuentra ingresando al sistema.

Como lo señala Modest (2013), se tiene la Ecuación de Transferencia Radiativa escrita en su forma general:

$$\frac{dI_{\lambda}}{ds} = -\kappa_{\lambda}I_{\lambda} + j_{\lambda} + \sigma_{\lambda} \int_{4\pi} I_{\lambda,inc} \Phi(\Omega_i, \Omega) d\Omega_i \quad (6)$$

Donde I_{λ} es la intensidad de radiación en la línea de visión s y longitud de onda λ ,

el coeficiente de absorción k_λ , el coeficiente de emisión j_λ , el coeficiente de dispersión σ_λ , $I_{\lambda,inc}$ es la intensidad de radiación que incide, y la función de fase $\Phi(\Omega_i, \Omega)$ que describe la probabilidad que un rayo de una dirección Ω_i se disperse hacia el cono Ω .

3.6.1. Ley de Bouguer-Lambert-Beer

A partir de la Ecuación de Transferencia Radiativa, y siguiendo el trabajo de Thomsen et al. (2023), realizando la aproximación a la línea de visión y realizando las suposiciones de que no existe incidencia por parte de la dispersión ($\sigma_\lambda = \mathbf{0}$) ni de la emisión ($j_\lambda = \mathbf{0}$), queda:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -\kappa_\lambda I_\lambda \quad (7)$$

Luego, realizando la integración considerando una línea de visión desde $s = \mathbf{0}$ hasta $s = L$:

$$\int_0^L \frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = - \int_0^L \kappa_\lambda ds \quad (8)$$

Se define el espesor óptico τ_λ como:

$$\tau_\lambda = \int_0^L k_\lambda ds \quad (9)$$

Luego, considerando la ecuación (8) en la ecuación (7) y resolviendo la integral del lado izquierdo, se tiene:

$$\ln\left(\frac{I_\lambda(L)}{I_\lambda(0)}\right) = -\tau_\lambda \quad (10)$$

Aplicando la exponencial a la ecuación (9), se obtiene finalmente la Ley de Bouguer-Lambert-Beer:

$$I_\lambda(L) = I_\lambda(0)e^{-\tau_\lambda} \quad (11)$$

Donde $I_\lambda(L)$ es la intensidad de radiación transmitida e $I_\lambda(0)$ es la intensidad de radiación incidente.

3.6.2. Ecuación integral de Abel

Considerando la RTE expuesta anteriormente, las aproximaciones de la Ley de Bouguer-Lambert-Beer y pensando en el cálculo de la fracción en volumen de hollín en términos experimentales, cuando se lleva a cabo la captura de imágenes de la llama, se sabe de Jenkins & Hanson (2001) que la transmisividad τ_λ con llama y la fuente de luz encendida (S) y apagada (S'), y sin llama la intensidad del láser con la fuente de luz encendida (I_0) y apagada (I'_0), se define como:

$$\tau_\lambda = \frac{S - S'}{I_0 - I'_0} \quad (12)$$

De lo cual es posible llevar a cabo una relación de la intensidad de luz que es transmitida con el coeficiente de absorción del hollín k_λ , reiterando que no hay dispersión y que las partículas poseen un pequeño tamaño en comparación con la longitud de onda de la fuente de luz, con lo cual se hace uso de la ecuación integral de Abel (Åkesson & Daun, 2008):

$$-\ln(\tau_\lambda) = 2 \int_y^R \frac{k_\lambda(r)r}{\sqrt{r^2 - y^2}} dr \quad (13)$$

En donde se hace necesario llevar a cabo un proceso de deconvolución, dado que el sensor de la cámara experimental es capaz de captar señales y procesarlas para dar como resultado una imagen en 2 dimensiones, pero la llama está en 3 dimensiones, por lo que es necesario utilizar el método de deconvolución Onion-Peeling, el cual discretiza la llama en N segmentos equiespaciados (la deconvolución y la elección del método Onion-Peeling es abordado en la **Sección 3.9**). Luego, es necesaria una estabilización con el fin de corregir los errores de la deconvolución, por lo que se ocupa la regularización de Tikhonov, la cual permite suavizar la solución.

3.6.3. Fracción en volumen de hollín

Dando solución a la ecuación integral de Abel mediante el cálculo de la transmisividad τ_λ a lo largo del camino óptico de un rayo de luz de diferentes matices, mediante el uso de la Función de Absorción E_m definida por Chang & Charalampopoulos (1990), es posible hallar la fracción en volumen de hollín f_s , la cual en base a lo indicado por Yon et al. (2021), se define como:

$$f_s = \frac{k_{abs}\lambda}{6\pi E_m} = \frac{k_{ext}\lambda}{6\pi E_m(1 + \omega_\lambda)} \quad (14)$$

Donde se tiene el coeficiente de absorción k_{abs} , que al despreciar el efecto de la dispersión es igual al coeficiente de extinción k_{ext} , la longitud de onda propia del rayo de luz utilizado λ , la Función de Absorción E_m y el albedo de dispersión ω_λ , el cual a su vez se define como la fracción entre la radiación que es dispersada y la radiación total, en base a la siguiente ecuación:

$$\omega_\lambda = \frac{\sigma_\lambda}{k_{ext}} \quad (15)$$

Donde el coeficiente de extinción k_{ext} es:

$$k_{ext} = k_{abs} + \sigma_\lambda \quad (16)$$

De lo anterior, se pueden sacar dos conclusiones: por un lado, un albedo de dispersión ω_λ cercano a 1 indica que la extinción de la radiación ocurre mayoritariamente por el efecto de la dispersión; por otra parte, un valor cercano a 0 indica que la extinción de la radiación ocurre mayoritariamente por el efecto de la absorción. Ambos casos tienen una repercusión en la interpretación que es posible obtener acerca de las medidas de extinción, y, en efecto, en la estimación que se realiza de la fracción en volumen del hollín.

3.7. Técnicas ópticas para la obtención de parámetros

A partir de lo indicado por Schwarz (1996), dentro de las técnicas ópticas para obtención de parámetros en los procesos de estudios de las llamas podemos encontrar:

- Schlieren Tomography, la cual utiliza el efecto Schlieren para medir la distribución espacial de propiedades como la densidad y el índice de refracción en llamas, basándose en el hecho de que los flujos transparentes causan variaciones en el índice de refracción del medio, lo que se traduce en una desviación en la trayectoria que sigue un rayo de luz al pasar por regiones que se sometan a cambios en su densidad. Por esto, es de esperar que en la imagen capturada por la cámara se revelen patrones de luz y sombra que corresponden a las modificaciones en la densidad en el flujo. Es un método no invasivo y permite obtener información sobre la temperatura

dentro de la flama.

- Emisión/Absorción Tomográfica, que es una metodología utilizada para la obtención de imágenes y caracterización de sistemas reactivos, permitiendo la medición de la temperatura de la llama con partículas luminiscentes mediante la combinación de la emisión y absorción de radiación en distintas direcciones. Mediante la tomografía y la espectroscopia se lleva a cabo una reconstrucción en tres dimensiones de las propiedades de un cuerpo en estudio, utilizando los datos medidos de la emisión y la absorción.

Los ejemplos anteriores han sido utilizados por diversos autores en los estudios ópticos en fluidos, en combustión, en procesos aerodinámicos, diagnósticos de llamas, incluso en la ingeniería biomédica, aportando con imágenes que proporcionan mediciones más precisas acerca de las propiedades físicas y químicas de distintos objetos. Para el caso en estudio acerca de la implementación de un aparato experimental, se hará hincapié en la técnica LOSA y en la técnica MAE, las cuales tienen diversas aplicaciones en la combustión y en el estudio de las llamas.

3.7.1. Line-Of-Sight Attenuation (LOSA)

La técnica de atenuación a lo largo de la línea de visión (LOSA, por su sigla en inglés), es una metodología óptica que se ocupa para realizar mediciones de especies absorbentes, como es el caso del hollín, en medios del tipo gaseosos o en las llamas, midiendo la atenuación de la luz a lo largo de la línea de visión del medio

en el cual se esté ejecutando el estudio (Ling et al., 2024).

El método consiste en que el haz de luz emitido por una fuente, como una lámpara o un láser, atraviesa el medio absorbente, en este caso la llama, antes de llegar a un detector, que puede ser un sensor óptico o una cámara. Además, se utiliza una esfera integradora para capturar mejor la luz. La atenuación de la luz se puede calcular comparando la intensidad del haz atenuado con la del haz no atenuado, lo que permite determinar la transmisividad del sistema.

Un set experimental para la aplicación de LOSA consta de:

- Una fuente de luz, por ejemplo, un láser que emite un haz de luz colimado a una longitud de onda establecida.
- Aparato de detección, ya sea un fotodetector o una cámara que permite tomar mediciones de la intensidad de la luz transmitida a través del medio en estudio.
- Control y adquisición de datos, con lo cual sea posible tener una correcta manipulación de la emisión de luz, la detección de esta y la correspondiente toma de datos de la intensidad.

Es clave realizar una calibración previa en la cual sea determinada la intensidad de luz incidente sin el medio absorbente, luego medir la intensidad de luz que es transmitida en el medio absorbente. Con esto, se utiliza la ley de Bouguer-Lambert-

Beer para la obtención del espesor óptico, con el cual es posible determinar la relación entre el coeficiente de absorción del hollín y la fracción en volumen de hollín f_s , como se mostró en la **Sección 3.6** en donde se exponen las bases fundamentales de la técnica LOSA, para finalmente en base a la técnica MAE explicada a continuación, se realice el cálculo de estas variables para obtener la temperatura del hollín T_s .

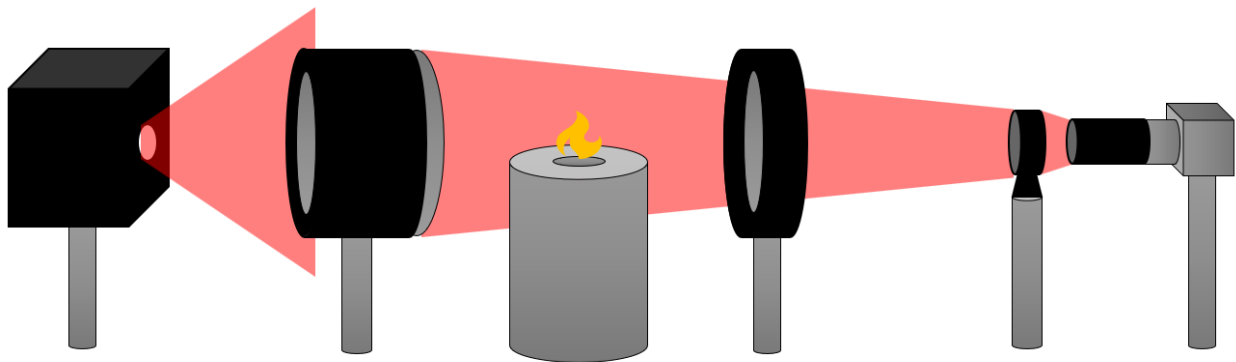


Figura 3: Esquema de la técnica LOSA.

3.7.2. Modulated Absorption/Emission (MAE)

Es un método avanzado que modula una fuente de luz y mide la emisión y la absorción de radiación en el sistema en estudio. Esta modulación realizada en la fuente de luz permite obtener una división de las señales de la emisión y la absorción, con lo que se logra dar con datos precisos acerca de la concentración del hollín y de la temperatura.

De manera similar a la técnica LOSA, un set experimental para la aplicación de MAE

consta de:

- La fuente de luz modulada, con una intensidad que permita ser modulada a una frecuencia específica, por ejemplo, un láser.
- Aparatos de detección, por ejemplo, cámaras que midan la intensidad de la luz transmitida y emitida por la llama.
- El modulador, que permita modular la fuente de luz.
- Adquisición de datos, con lo cual se capten los datos necesarios y sea posible procesar las señales.

Este método consiste en realizar una modulación a la intensidad de la fuente de luz a una frecuencia particular, luego esta fuente incide a través de la llama y con aparatos de detección se mide la intensidad que es transmitida. Al mismo tiempo, se toman mediciones de la radiación que es emitida por el hollín en la llama. Se aplican técnicas de deconvolución para poder obtener los mapas radiales correspondientes a la absorción y la emisión. Finalmente, con estos datos capturados se tiene una relación del coeficiente de extinción k_{ext} como una aproximación del coeficiente local de absorción k_{abs} , con lo cual se obtiene la fracción en volumen de hollín f_s con la ecuación (14). Ahora, sabiendo que la intensidad total debe ser proporcional a la intensidad de cuerpo negro en equilibrio termodinámico, entonces se tiene:

$$J_{\lambda} = k_{abs} \cdot B(T_s, \lambda) \quad (17)$$

En donde $B(T_s, \lambda)$ es la intensidad espectral de Planck, la cual es definida por Modest (2013):

$$B(T_s, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_b T_s}\right) - 1} \quad (18)$$

Ahora, para obtener la fórmula de la temperatura del hollín, se hace necesario tener ciertas consideraciones para la intensidad espectral de Planck para lograr simplificar el denominador, lo cual es posible llevarlo a cabo con la aproximación de Wien, la cual tiene sus fundamentos en la simplificación de la ley de Planck para casos en donde se tienen longitudes de onda mucho menores que la máxima admisible por la distribución de Planck, con aplicaciones para la determinación de temperaturas de un cuerpo negro a partir de su espectro de emisión, o para análisis espectrales.

En términos simples, si consideramos el cambio de variable $x = \frac{hc}{\lambda k_b T_s}$, se plantea

lo siguiente:

$$\frac{1}{e^x - 1} \approx e^{-x} \quad (19)$$

Ecuación la cual se puede cumplir en 2 casos:

1. Cuando la longitud de onda λ es pequeña, con lo cual el exponente de la exponencial se vuelve grande, es decir, se está observando la radiación en la zona de frecuencias altas del espectro (rayos x, ultravioleta, etc.).
2. Cuando la temperatura T_s es alta, con lo cual el exponente de la exponencial se vuelve pequeño, pero al mantenerse la longitud de onda constante, el numerador hc sigue siendo mayor, haciendo que la fracción sea mucho mayor que 1, y, por ende, también la exponencial, permitiendo simplificar la expresión tal como la ecuación (19).

Por lo anterior, se puede reescribir la ecuación (18) como:

$$B(T_s, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_b T_s}\right)} \quad (20)$$

Luego, reemplazando la ecuación (20) en la ecuación (17), reordenando y despejando es posible calcular la temperatura del hollín de la llama T_s , fórmula similar al estudio llevado a cabo por Schwarz (1996) y por Yon et al. (2021):

$$T_s = \frac{hc}{k_B \lambda \ln\left(\frac{2hc^2 k_{abs}}{\lambda^5 J_\lambda}\right)} \quad (21)$$

Donde k_B es la constante de Boltzmann:

$$k_B = 1,3806 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \quad (22)$$

Luego, **h** es la constante de Planck:

$$h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \frac{J}{s} \quad (23)$$

Finalmente, **c** es la velocidad de la luz en el vacío:

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad (24)$$

3.8. Absorción radiativa y Emisión radiativa

La medición de la absorción es realizada mediante la iluminación de la llama con la fuente de luz modulada, luego la luz que es absorbida por el hollín en la llama se traduce en una reducción de la intensidad de la luz que es transmitida por la fuente, lo que puede ser medido con el aparato de detección.

La ecuación de la absorción radiativa es:

$$I_t = I_0 \cdot e^{-k_\lambda \cdot L} \quad (25)$$

En donde **I_t** es la intensidad de la luz transmitida, **I_0** es la intensidad de la luz que

incide, k_λ es el coeficiente de absorción del hollín, y L es la longitud del camino óptico a través de la llama.

Así como la luz es absorbida por el hollín en la llama, esta también es emitida en forma de radiación térmica, en donde esta intensidad depende de la temperatura del hollín, midiéndose la emisión al mismo tiempo que la absorción.

La ecuación de la emisión radiativa es:

$$I_e = \epsilon_\lambda \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (26)$$

En donde I_e es la intensidad de la radiación emitida, ϵ_λ es la emisividad del hollín, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T_s es la temperatura del hollín (Tec-Science, 2020).

3.9. Deconvolución

En términos simples, un proceso de deconvolución se define como una técnica computacional de carácter matemático que permite realizar un efecto inverso al proceso de convolución, el cual altera o deteriora una imagen o señal captada, ya que dada la geometría de un sistema en estudio y las propiedades ópticas existentes en el medio, se generan capturas con ruido o desenfoques que se traducen en pérdidas de detalles importantes en los análisis realizados. Para el caso

de las llamas, es posible llevar a cabo una reconstrucción de las propiedades internas de ella, así como también la distribución de temperatura en datos capturados en experimentos en donde participan los procesos explicados en secciones anteriores (emisión, absorción, etc.).

Mediante esta inversión de la convolución, se quiere recuperar la señal original en base a proyecciones o datos medidos. La motivación principal de aplicar esta técnica es para reconstruir las distribuciones de temperatura de la llama, ya que, para efectos de la combustión, esto es algo crucial si lo que se quiere es lograr una optimización del proceso. Junto con esto, es posible estudiar la distribución espacial del hollín para así clarificar y mejorar los cálculos de la fracción en volumen del hollín.

Teniendo claro que la deconvolución tiene como objetivo mejorar la precisión y la estabilidad de las reconstrucciones de señales, existen diversos métodos de deconvolución, como los utilizados por Dasch (1992), entre los cuales es posible encontrar:

- Filtered Back-Projection (FBP): Es un método que, mediante la utilización de un algoritmo de retroproyección filtrada, lleva a cabo la reconstrucción de una imagen a partir de sus proyecciones.
- Abel Three Point (ATP): Es un método que hace uso de una interpolación de tres puntos para realizar la inversión de Abel, permitiendo ser aplicada en el

estudio de perfiles radiales simétricos en las llamas.

Los métodos anteriores fueron utilizados en el estudio de la tomografía de objetos cilíndricamente simétricos, junto con el método de deconvolución llamado Onion-Peeling, el cual será profundizado a continuación.

3.9.1. Método Onion-Peeling

Este es un método que, mediante una discretización de la llama, realiza una evaluación de la intensidad de radiación en diferentes capas desde la parte exterior hacia la interior de la llama. Siguiendo los trabajos de Dasch (1992) y de Daun et al. (2006), el método de deconvolución Onion-Peeling tiene una gran utilidad en la descomposición de los perfiles de emisión axialmente simétricos. Este método discretiza la llama en N segmentos equiespaciados que tienen un ancho de:

$$\Delta r = \frac{R}{N - 0,5} \quad (27)$$

Teniendo en consideración la ecuación integral de Abel plasmada en la ecuación (13), debido a su naturaleza de mal condicionamiento, reiterando también que por la ecuación (16) al no haber dispersión se tiene un coeficiente de extinción igual al coeficiente de absorción del hollín, se tiene la solución analítica de la integral de Abel:

$$k_{\lambda}(r) = -\frac{1}{\pi} \int_y^R \frac{P'(y)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (28)$$

Con $P(y) = -\ln(\tau_{\lambda})$. Luego, la distribución $k_{\lambda}(r)$, conocida también como $f(r)$, se asume que es uniforme en cada elemento, quedando la ecuación discretizada de la siguiente manera:

$$P_i = 2 \sum_{j=1}^{N-1} f_j \int_{r_{j-0,5\Delta r}}^{r_{j+0,5\Delta r}} \frac{r}{\sqrt{r^2 - y_i^2}} dr \quad (29)$$

Donde $y_i = i\Delta r$, $r_j = j\Delta r$, $P_i = P(y_i)$ y f_j aproxima a $f(r_j)$.

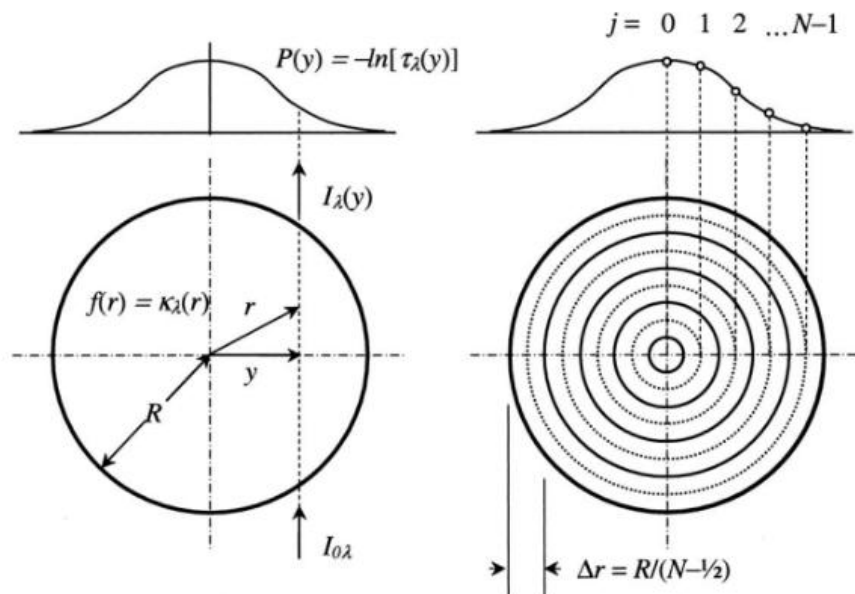


Figura 4: Método de deconvolución Onion-Peeling para la evaluación del coeficiente de absorción espectral local de una llama axisimétrica.

Fuente: Daun et al. (2006).

Considerando la conversión a elementos anulares, se reescribe la ecuación (29) determinando el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$A_{OP}x = b \quad (30)$$

$$x^T = [k_{ext_0}, k_{ext_1}, \dots, k_{ext_{N-1}}] \quad (31)$$

$$b^T = [P(r_0), P(r_1), \dots, P(r_{N-1})] \quad (32)$$

Donde $P(r_0) = -\ln(\tau_{\lambda_0})$, $P(r_1) = -\ln(\tau_{\lambda_1})$, ... y así sucesivamente. Luego, se define la matriz A_{OP} de la siguiente manera:

$$A_{OP} = \begin{cases} 0 & , j < i \\ 2\Delta r[(j + 0,5)^2 - i^2]^{0,5} & , j = i \\ 2\Delta r[(j + 0,5)^2 - i^2]^{0,5} - [(j - 0,5)^2 - i^2]^{0,5} & , j > i \end{cases} \quad (33)$$

3.9.2. Regularización de Tikhonov

Como la ecuación de Abel está mal condicionada, esto se traduce en que mínimas variaciones en los datos proyectados conllevan una incertidumbre mayor en la emisión de hollín que se recupera en el procedimiento de deconvolución, por lo cual se hace necesario llevar a cabo un proceso de estabilización o regularización de la deconvolución realizada mediante Onion-Peeling, lo cual se logra con la regularización de Tikhonov generándose el siguiente sistema de ecuaciones:

$$(A_{OP}^T A_{OP} + \alpha_0 L_0^T L_0) x^* = A_{OP}^T b \quad (34)$$

Donde la matriz L_0 es una matriz de regularización de $n \times n + 1$, y se define como:

$$L_0 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Es posible plantear la ecuación (34) de manera simplificada, obteniéndose:

$$A_{Tik} x^* = b_{Tik} \quad (36)$$

Donde $A_{Tik} = A_{OP}^T A_{OP} + \alpha_0 L_0^T L_0$, $b_{Tik} = A_{OP}^T b$, α_0 es el parámetro de regularización y x^* es la solución regularizada.

4. Montaje experimental

El presente montaje experimental fue armado en el Campus Vitacura de la USM con el objetivo principal de habilitar una mesa óptica en su totalidad, para llevar a cabo análisis de llamas de difusión laminar generadas por la ignición de muestras de Eucaliptus mediante la aplicación de técnicas no intrusivas, y con esto lograr la determinación de la fracción en volumen de hollín para dos tamaños de muestras de Eucaliptus distintos.

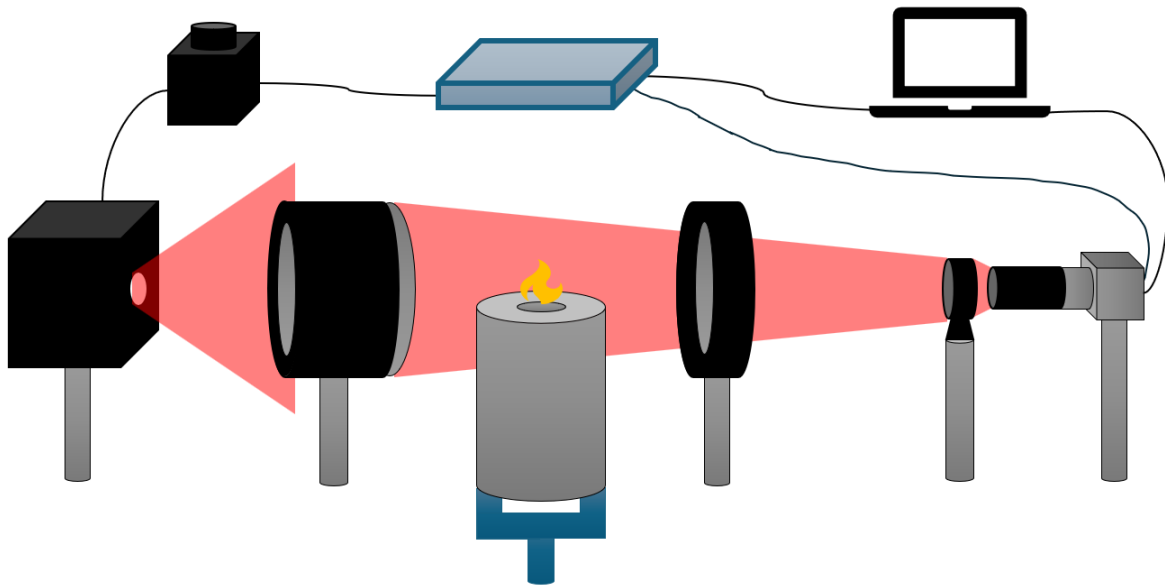


Figura 5: Esquema del montaje experimental a implementar.

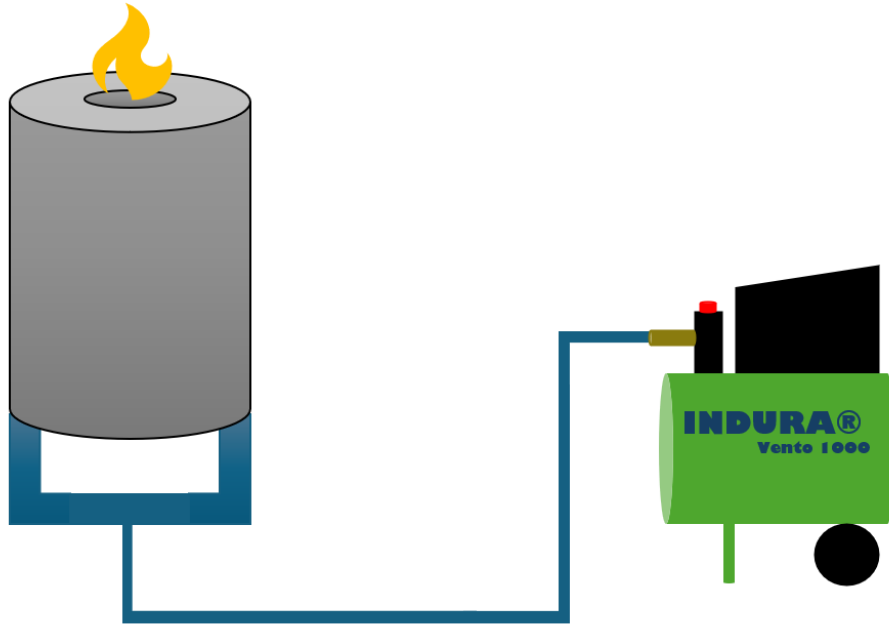


Figura 6: Esquema del quemador y del flujo de aire a implementar.

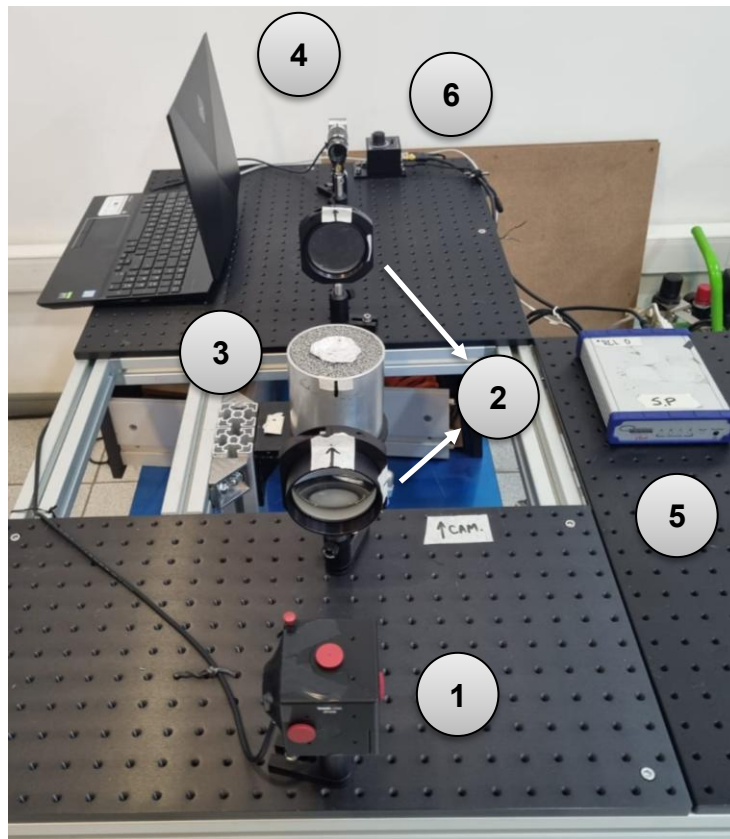


Figura 7: Rack experimental con los aparatos ópticos instalados en el Campus

Vitacura de la USM.

En la figura 7 es posible apreciar los siguientes aparatos:

- 1) Fuente de luz.
- 2) Lentes acromáticos.
- 3) Quemador.
- 4) Cámara.
- 5) Generador de pulso
- 6) Controlador LED.

4.1. Fuente de luz

Para la fuente de luz, se utiliza un LED en una placa de circuito impreso con núcleo metálico M660D2, el cual se encuentra diseñado para entregar una salida de alta potencia de color rojo oscuro, con una longitud de onda nominal de 660 nm. La potencia mínima que emite es de 940 mW y la típica es de 1050 mW. El LED es montado a un soporte Thorlabs SM05RC/M, con el cual se realiza la conexión a una esfera de integración 2P4/M, con el objetivo de formar una distribución uniforme de la luz emitida por el LED mediante múltiples reflexiones sobre toda la superficie de la esfera, la cual pasa por los lentes acromáticos encargados de la colimación de este haz de luz.

Para la fuente de alimentación del LED, se hace la conexión con un controlador LED T-Cube LEDD1B mediante un cable de conexión M8 de 4 pines, el cual ofrece tres

modos de funcionamiento: modo de corriente constante, modo de modulación y modo de activación (trigger), permitiendo tener un control de la intensidad del LED para la aplicación de las técnicas. Este controlador va también conectado a un generador de pulso Quantum Composers Sapphire Plus, modelo 9214+, con el cual es posible mantener el LED en modo Trigger para optimizar la captura de imágenes con la cámara para el cálculo de la transmisividad τ_{λ} .

4.2. Lentes acromáticos

En cuanto a la colimación del haz de luz, se utilizan 2 lentes acromáticos:

1. El más cercano al haz de luz es un TECHSPEC® VIS-NIR Coated Achromatic Lens 75 mm Dia. x 300 mm FL, con un rango de longitud de onda de 400 a 1000 nm.
2. El más cercano a la cámara es un TECHSPEC® VIS-NIR Coated Achromatic Lens 75 mm Dia. x 150 mm FL, con un rango de longitud de onda de 400 a 1000 nm.

4.3. Cámara

La cámara que se utiliza en este experimento es una Basler ace acA1440-220um USB 3.0 Monochrome Camera, la cual se gestiona mediante el software Pylon Viewer para las configuraciones y la toma de imágenes, con las cuales posteriormente se hace el procesamiento y la extracción de los datos para el cálculo de la fracción en volumen de hollín y la temperatura. A la cámara se le coloca un

lente marca NAVITAR F2.8/50mm, modelo 16R0017301, con el fin de enfocar la luz y formar una imagen nítida en el sensor de la cámara al momento de la captura de imágenes.

La cámara Basler también es conectada al generador de pulso Quantum, con el fin de mantener la instantaneidad con el láser mediante el Trigger, y optimizar la captura de imágenes para el cálculo de la transmisividad τ_λ .



Figura 8: Cámara Basler, lente NAVITAR y filtro utilizado para la experimentación.

4.4. Quemador

El quemador para el estudio de llamas no premezcladas a pequeña escala producidas con combustibles forestales es una estructura cilíndrica de aluminio en

la cual se deposita un portamuestras poroso, cuya porosidad es del orden de 50 poros por pulgada. El portamuestras fue perforado para formar un volumen cilíndrico donde se pudieran depositar el combustible forestal a utilizar. El portamuestras, utilizado para esta experimentación es de 3,0 cm, con una profundidad de 5 mm. En el interior del quemador, unas bolas de alúmina sostenidas por una malla se encargan de homogeneizar el flujo de aire.



Figura 9: Quemador con estructura cilíndrica de aluminio, montado con el portamuestras de 3,0 cm de diámetro.

4.5. Flujo de aire

La sustancia que favorece la combustión en este caso es aire proveniente de la atmósfera mediante un compresor Indura Vento 1000 de 1,5 hp, que tiene conectado en la salida un filtro E-MC modelo HEW3000-035-T con el objetivo de

evitar impurezas en el aire, y se almacena en un tanque moderando el flujo en base a una válvula de control, siendo medido por un medidor de flujo másico Aalborg modelo GFM37 con una resolución de 0,1 L/min y un caudal máximo de 30 L/min.



Figura 10: Compresor Indura Vento 1000 de 1,5 hp utilizado en la experimentación.

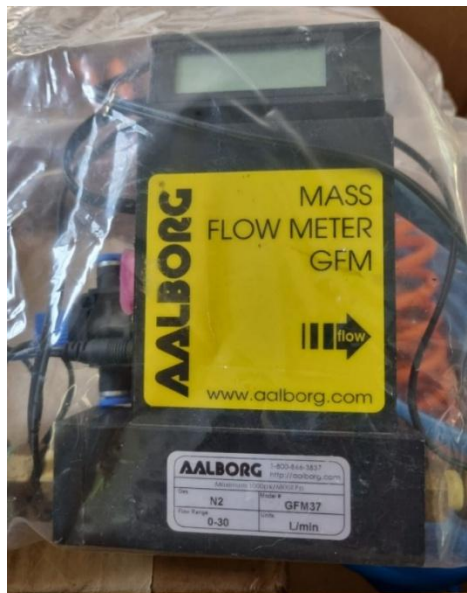


Figura 11: Medidor de flujo másico Aalborg modelo GFM37 utilizado en la experimentación.

4.6. Muestra

El quemador utilizado en esta experimentación cuenta de un portamuestras poroso que fue perforado para dejar un espacio cilíndrico en donde se puedan depositar los combustibles silvestres, en este caso, Eucaliptus Globulus, extraída del bosque Tranque de la Luz, ubicado en Av. Obispo Valdés Subercaseaux, Curauma, Valparaíso.

El Eucaliptus conseguido fue almacenado sin cortarlo en cajas de cartón, con el fin de mantener la humedad lo más controlada posible. Junto con esto, se dejaron parcialmente al sol para lograr muestras más secas antes de comenzar a quitar las hojas. Una vez separadas las hojas, se utilizó una picadora 1, 2, 3 modelo Moulinex de 750 W para lograr moler el eucaliptus previo al proceso de tamizado. En este último se busca mantener una rigurosidad en el diámetro de la muestra, ya que se debe considerar que el portamuestras tiene poros por los cuales las muestras más pequeñas se escurren, y no se mantienen en el espacio cilíndrico dispuesto. En el proceso de tamizado se distinguen el tamaño N°1 y el tamaño N°2:

1. Entre 0,5 y 1 mm.
2. Entre 1 y 3 mm.

Junto con esto, para lograr una humedad lo más cercana al 0% y al no contar con un horno de precisión de secado, en su reemplazo se utilizó un Deshidratador de alimentos marca Bfresh, con una potencia de 250 W y un rango de temperatura

controlable entre 35° a 70°, para lo cual, siguiendo el trabajo de Reveco et al. (2024), en donde se indica que el porcentaje de humedad en el combustible al transcurrir más de 15 horas de secado es del 0%, y luego tanto de Severino et al. (2020) como de Pinto et al. (2024) en los cuales se recomienda un secado continuo a 60°, se ajustó el deshidratador a 60° por un tiempo de 18 horas continuas, asegurando que las muestras de Eucaliptus de ambos tamaños utilizadas tienen un 0% de humedad para la presente experimentación.



Figura 12: Picadora 1, 2, 3 marca Moulinex de 750 W, utilizada para picar el Eucaliptus.



Figura 13: Deshidratador de alimentos utilizado en reemplazo del horno de precisión de secado.



Figura 14: Muestras de Eucaliptus de tamaños 0,5 a 1 mm (izquierda) y de 1 a 3 mm (derecha), depositadas en el Deshidratador de alimentos para el proceso de secado.

5. Análisis y Resultados

5.1. Condiciones experimentales

- Para ambos casos de captura de imágenes, entiéndase con llama y sin llama, se tomaron 200 fotografías en formato .tiff, con un tamaño de imagen de 1440x1080, y un formato de pixel Mono12.
- Las muestras fueron tamizadas, en donde se utilizó aquellas entre 0,5 mm a 1 mm, y también aquellas de 1 a 3 mm. Luego, fueron secadas por 18 horas continuas en el Deshidratador de alimentos a 60°.
- El tiempo de exposición se fijó a 3500 μ s para el Eucaliptus tamaño N°1 y en 3100 μ s para el Eucaliptus tamaño N°2.
- El flujo de aire se mantuvo constante a los 31,6 L/min.
- Como combustible para la ignición se utilizó Alcohol Desnaturalizado 95%.
- La longitud de onda trabajada es de 660 nm.

5.2. Procedimiento experimental

5.2.1. Preparación de las muestras

En primer lugar, se realiza la separación de las hojas de Eucaliptus secadas al sol y se someten a la picadora Moulinex, con el fin de reducir el tamaño de la muestra previo al tamizado. Luego, utilizando un tamizado de 1 mm se comienza a filtrar el

Eucaliptus y se almacena aquel menor a 1 mm, el cual se pasa por el tamizado de 0,5 mm. Todo lo filtrado por este último es descartada de la experimentación, debido a su pequeño tamaño y que se escurre por el portamuestras. Lo utilizado es lo que queda sobre este tamiz de 0,5 mm, el cual ya fue filtrado por el tamiz de 1 mm con anterioridad, con lo cual se obtiene el tamaño de muestras N°1. Junto con esto, toda la muestra que queda sobre este tamiz de 1 mm es utilizada para ser filtrada por un tamiz de 3 mm, donde se almacena para la experimentación aquella muestra con el tamaño N°2.

Posteriormente, las muestras se depositan sobre aluminio en el interior del Deshidratador de alimentos Bfresh en la capa baja del aparato y con mayor cercanía a la fuente de calor, y se mantienen durante 18 horas continuas a 60°.

Una vez transcurridas las 18 horas de secado del Eucaliptus en el Deshidratador de alimentos, se coloca la muestra en el espacio cilíndrico de manera tal que se mantenga al ras y uniforme.

5.2.2. Configuración de cámara y software

Durante el proceso final de preparación de las muestras del Eucaliptus, se realiza el encendido y configuración del controlador de pulso, en donde se coloca en el Canal B al controlador del LED y en el Canal D el cable para trigger de la cámara. Mediante la aplicación Quantum Composers Model 9214+ SW Version:1.2.3.0, se

realiza el seteo del Canal B del controlador del LED, el cual se ajusta en modo trigger considerando un modo de pulso continuo, modo de canal Duty Cycle con configuración de 1 encendido y 1 apagado, un periodo de 0,2 y un Width de 0,005; y también del Canal D del trigger de la cámara, considerando un modo de pulso continuo, modo de canal Normal, un periodo de 0,2 y un Width de 0,0001.

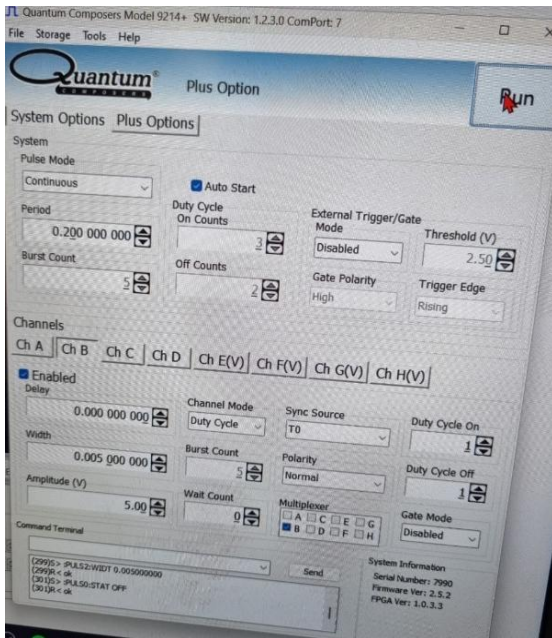


Figura 15: Configuración del software Quantum Composers Model 9214+ en el Canal B, correspondiente al controlador del LED.

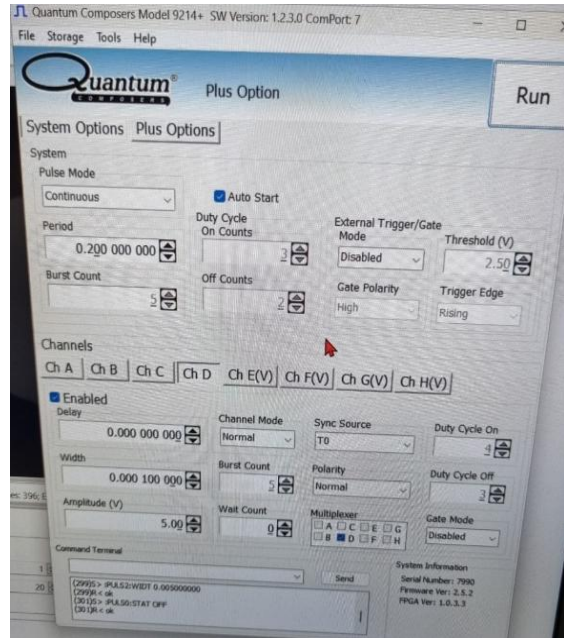


Figura 16: Configuración del software Quantum Composers Model 9214+ en el Canal D, correspondiente al cable del trigger conectado a la cámara Basler.

Junto con lo anterior, también se realiza la configuración de la cámara Basler, esto mediante el software pylon Viewer 64-bit, en la cual se mantienen la mayoría de las configuraciones estándar, con la excepción de que el “Pixel Format” se setea en “Mono 12”, y que en la categoría “Acquisition Control” el “Trigger Mode” se debe dejar en “ON”. Luego, se ajusta el tiempo de exposición según corresponda, en

donde para la presente experimentación fue seteado a 3500 μ s para el tamaño N°1 y luego a 3100 μ s para el tamaño N°2, lo cual se obtiene tras la realización pruebas de saturación que se llevaron a cabo utilizando el histograma del software:

- i) Primero, el tiempo de exposición de la cámara debe ser teniendo en consideración la intensidad de la llama sin LED, alcanzando aproximadamente la mitad de saturación en el histograma.
- ii) Segundo, con la llama encendida se regula la intensidad del LED hasta que en el histograma se observe cerca de la saturación.

5.2.3. Ignición de la muestra

Para la ignición de las muestras de Eucaliptus, con una pipeta se miden 0,3 ml del alcohol desnaturalizado 95% y se distribuyen en la muestra de manera circular desde los alrededores yendo hacia el centro. Con un fósforo se enciende la muestra una vez que se tengan encendidos todos los equipos necesarios para la medición.

5.2.4. Descripción del experimento

Una vez hayan sido distribuidas las muestras de Eucaliptus en el quemador y se haya configurada la cámara junto con los softwares, se enciende el compresor Indura Vento 1000, arrojando en el flujómetro un caudal inicial de 33,6 L/min que se estabiliza a 31,6 L/min en un par de segundos. Con esto, se realiza la activación del

controlador de pulso para que el trigger del LED y de la cámara sean controlados por el software Pylon Viewer e iniciados una vez se seleccione el modo captura.

Ejecutada la ignición de la muestra con un fósforo, se esperan 15 segundos desde que se enciende la llama antes de comenzar con las mediciones, con el fin de esperar que se quemara todo el alcohol y la llama pase del estado turbulento al laminar.

Se capturan 200 imágenes con llama encendida, 100 con LED encendido (S) y 100 con LED apagado (S'). Transcurrido poco más de 2 minutos la llama de Eucalipto se extingue. Se esperan unos segundos para que el humo cese y se toman 100 imágenes con llama apagada, 50 con LED encendido (I_0) y 50 con LED apagado (I'_0), siguiendo la conceptualización de la transmisividad explicada en la

Subsección 3.6.2.

En la figura 17 se puede apreciar la experimentación llevada a cabo, y en la figura 18 las llamas de ejemplo generadas por las muestras de Eucalipto:



Figura 17: Experimentación realizada en el Rack implementado en el Campus Vitacura de la USM.

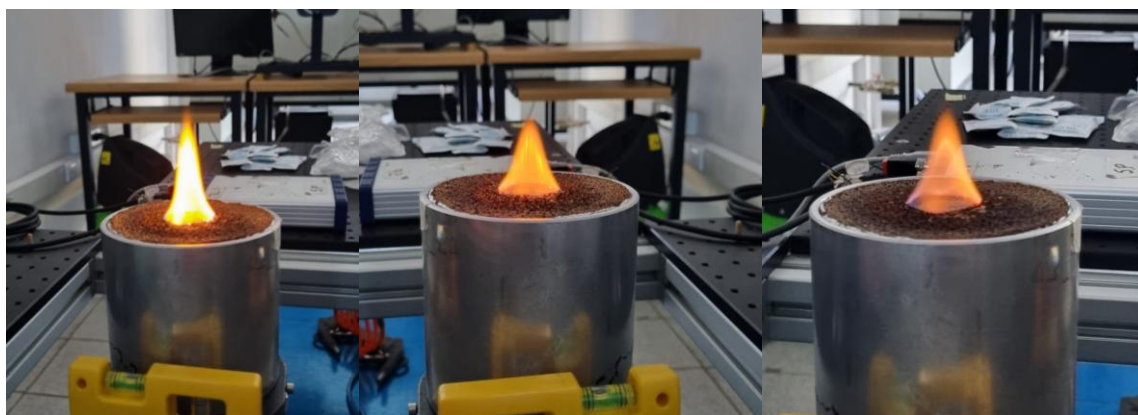


Figura 18: Llamas generadas tras la ignición de las muestras de Eucaliptus en el quemador del Rack implementado en el Campus Vitacura de la USM.

5.3. Procesamiento de las mediciones Tamaño N°1 y Tamaño N°2

Una vez obtenidas las imágenes de los 4 instantes requeridos para llevar a cabo el cálculo de la transmisividad, se comienza con la intensidad sin llama, para lo cual se realiza una asignación según las numeraciones de las fotos que van desde la 1 a la 100. Entonces, el código comienza adquiriendo este número y separando las fotos según los números pares, que son las capturas sin llama y sin LED, es decir, I'_0 , y los números impares, que son las capturas sin llama y con LED, es decir, I_0 , esto para las capturas tomadas para ambos tamaños de muestras como se aprecia a continuación:



Figura 19: Captura sin llama y con LED para muestras Tamaño N°1, correspondiente a I_0 .

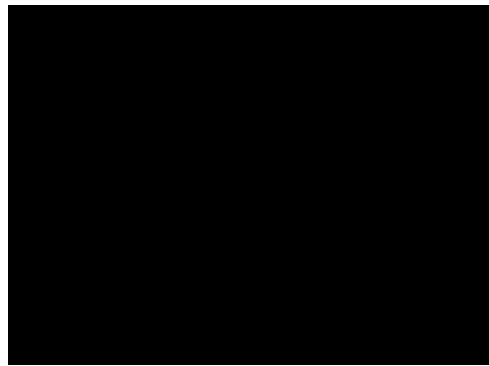


Figura 20: Captura sin llama y sin LED para muestras Tamaño N°1, correspondiente a I'_0 .



Figura 21: Captura sin llama y con LED para muestras Tamaño N°2, correspondiente a I_0 .



Figura 22: Captura sin llama y sin LED para muestras Tamaño N°2, correspondiente a I'_0 .

Realizado esto, el procesamiento en Python permite realizar una lectura de estas imágenes para luego extraer valores numéricos, los cuales son almacenados y posteriormente promediados en ambos casos (fotos pares e impares) para ambos tamaños de muestras:

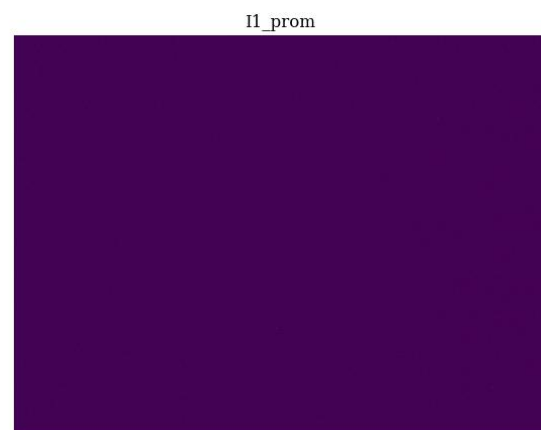
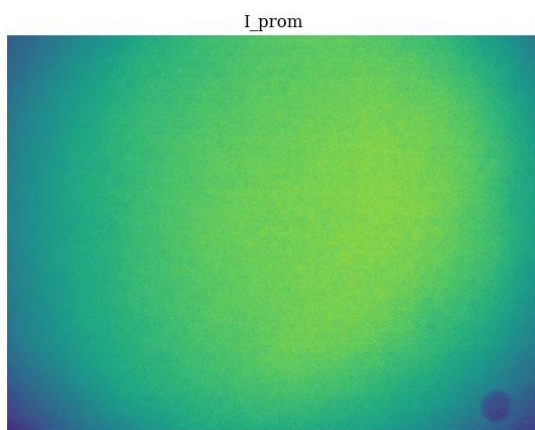


Figura 23: Capturas sin llama procesadas mediante Python para muestras Tamaño N°1.

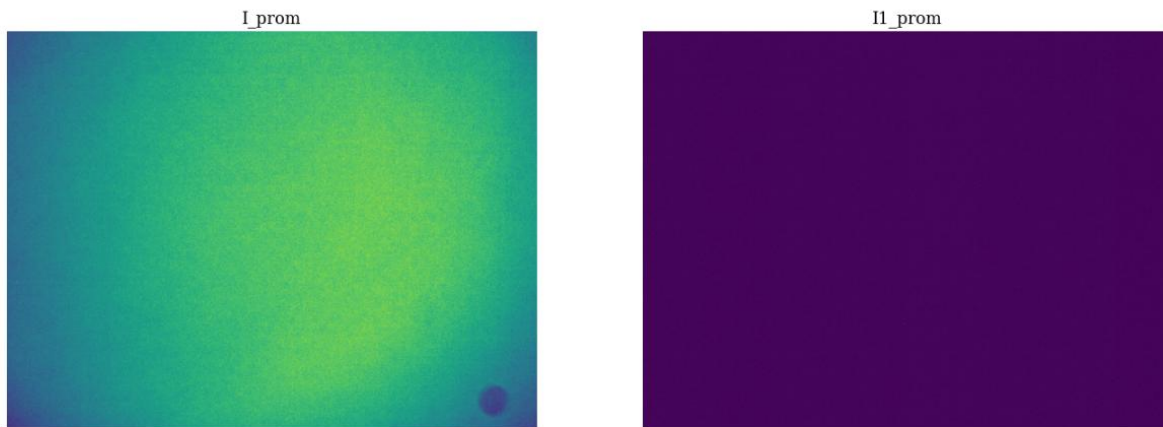


Figura 24: Capturas sin llama procesadas mediante Python para muestras Tamaño N°2.

Luego, para el caso siguiente con llama generada a partir de cada tamaño de muestras, se seleccionan 2 fotos en instantes continuos, es decir, cuando se visualiza la llama con LED y luego sin LED. Se extraen los valores numéricos y se calcula la transmisividad τ_λ en base a la ecuación plasmada en la **Subsección 3.6.2.** mediante un procesamiento en Python:

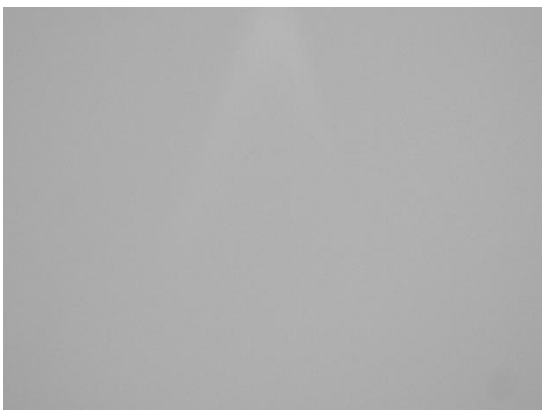


Figura 25: Captura con llama y con LED para muestras Tamaño N°1, correspondiente a S.



Figura 26: Captura con llama y sin LED para muestras Tamaño N°1, correspondiente a S'.



Figura 27: Captura con llama y con LED para muestras Tamaño N°2, correspondiente a S .



Figura 28: Captura con llama y sin LED para muestras Tamaño N°2, correspondiente a S' .

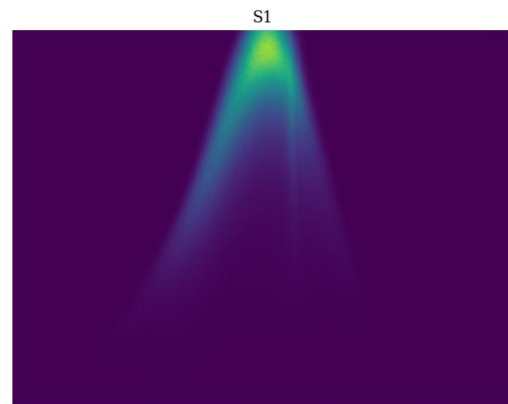
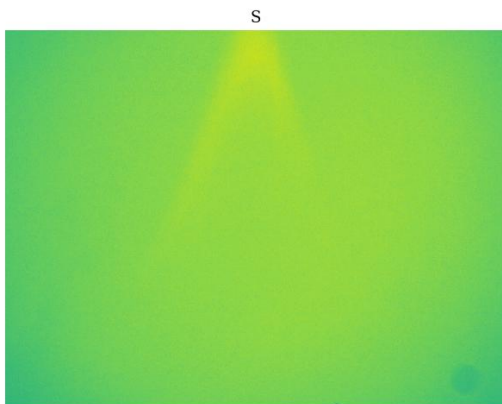


Figura 29: Capturas con llama para muestras Tamaño N°1 procesadas mediante Python.

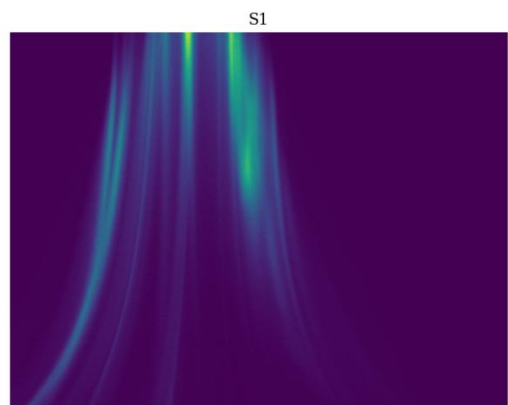
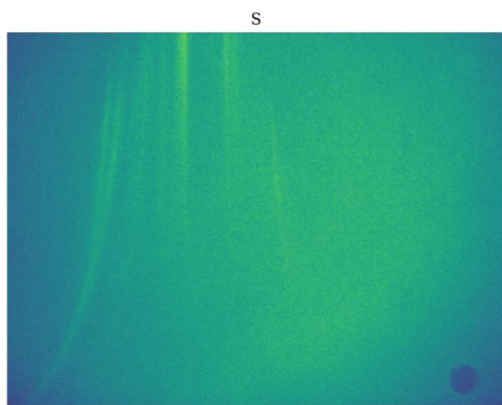


Figura 30: Capturas con llama para muestras Tamaño N°2 procesadas mediante Python.

5.3.1. Coeficiente de extinción

Obtenidas las capturas de la llama para cada tamaño de muestra, se realiza el proceso de deconvolución mediante Onion-Peeling profundizado en la **Sección 3.9.1.**, con lo que es posible obtener el coeficiente de absorción del hollín, el cual, tras realizar el análisis de la ecuación (16) al no haber efectos de la dispersión, entonces $k_{abs} = k_{ext}$.

Por lo anterior, gracias al proceso de deconvolución aplicado es posible la obtención del coeficiente de extinción para cada tamaño de muestra, para el cual se consideran distintas alturas de interés de la llama junto con el radio correspondiente, para facilitar el estudio posterior de la fracción en volumen de hollín:

Tabla 1: Resumen de valores obtenidos del coeficiente de extinción para muestras de Tamaño N°1 y Tamaño N°2.

z (mm)	Tamaño N°1		Tamaño N°2	
	r (mm)	$k_{ext_1}(\frac{1}{m})$	r (mm)	$k_{ext_2}(\frac{1}{m})$
26,50	0,64	8,05	0,41	5,02
25,50	0,82	7,27	0,50	4,76
24,50	1,01	6,31	0,77	3,80
23,50	1,30	7,66	1,44	4,25
22,50	1,35	4,89	0,97	3,99
20,00	0,68	2,51	1,48	5,80
19,50	1,70	2,45	1,15 & 1,46	6,18
18,50	0,11	3,67	1,06	6,89
17,50	1,96	2,58	1,09	5,47

5.3.2. Fracción en volumen de hollín para muestras Tamaño N°1

Una vez que la llama se estabiliza sobre la superficie de la muestra y se alcanza el régimen estacionario en aproximadamente $t = 60$ s, se procede a realizar las mediciones de la fracción en volumen de hollín. Para ello, se utilizan las capturas que se muestran en las figuras 25 y 26 y se realiza la deconvolución mediante Onion-Peeling, obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 1 anterior según las distintas alturas de interés. Para la obtención de la fracción en volumen de hollín, esta se despeja de la Función de Absorción E_m tal como en la ecuación (14), y teniendo en consideración lo indicado en la subsección anterior referente al coeficiente de extinción y que el albedo de dispersión ω_λ es igual a 0, se tiene:

$$f_s = \frac{k_{ext}\lambda}{6\pi E_m} \quad (37)$$

En donde k_{ext} corresponde al coeficiente de extinción de la Tabla 1, λ es la longitud de onda igual a 660 nm, y la Función de Absorción E_m se considera igual a 1, siguiendo el trabajo de Chang & Charalampopoulos (1990).

Dicho lo anterior, se calcula la fracción en volumen de hollín mediante Python para la obtención del campo y los perfiles radiales a las distintas alturas de interés consideradas para el coeficiente de extinción:

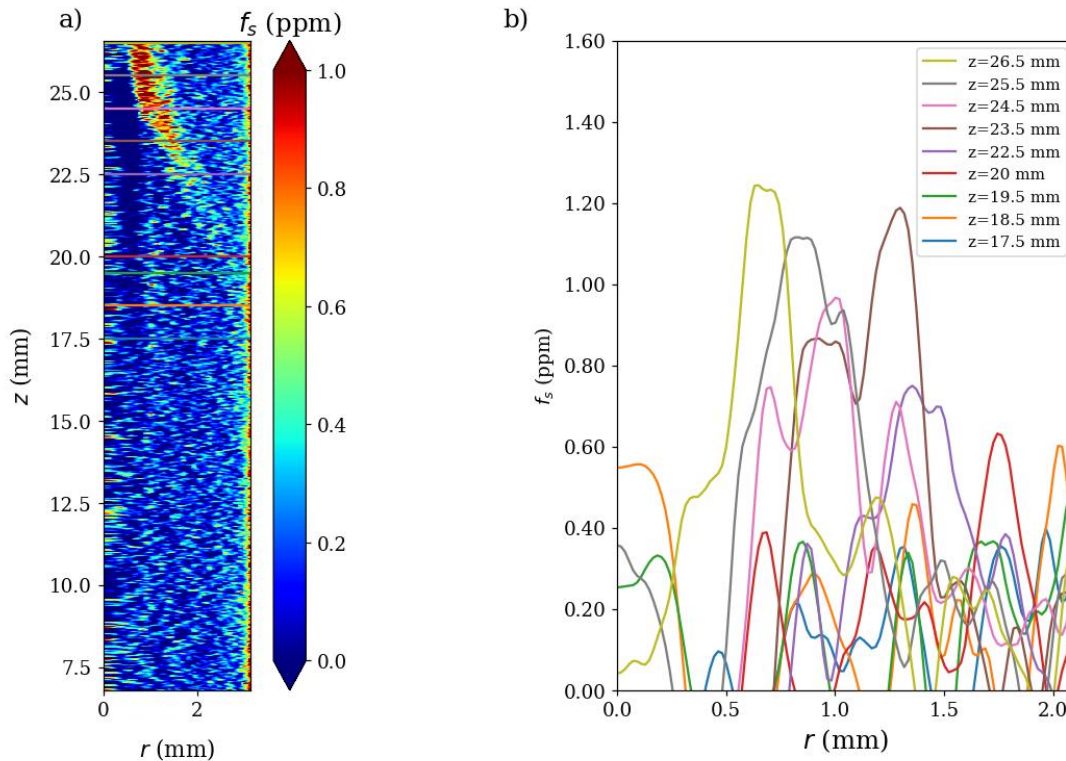


Figura 31: a) Campo de la fracción en volumen de hollín procesada en Python. b) Perfiles radiales de la llama a distintas alturas de estudio.

La figura 31 presenta el campo ajustado de la fracción volumétrica de hollín en la llama, junto con los perfiles radiales correspondientes a distintas alturas de interés, considerando que se logra una captación de la llama con una concentración en la parte superior. Para la interpretación de los resultados de f_s , se considera como altura cero la punta de la llama que se forma al alcanzarse el estado estacionario, siendo posible lograr una captura completa de la llama considerando la intensidad de combustión de muestras Tamaño N°1. Cabe destacar que para esta llama, desde la altura $z=22,50$ mm hasta $z=17,50$ mm los resultados son menores en comparación a los obtenidos en la cercanía de la punta de la llama, por lo cual la

zona óptima de estudio se encuentra entre $z=26,50$ mm y $z=22,50$ mm.

Los resultados obtenidos muestran que las mayores fracciones en volumen de hollín se localizan cerca de la punta y en la zona inmediatamente descendente del contorno de la llama, lo cual coincide con resultados de otras llamas de difusión bien caracterizadas como las observadas por Escudero et al. (2016). A medida que se incrementa la altura a lo largo del eje de la llama, la fracción volumétrica de hollín aumenta gradualmente, esto debido a que las partículas ascienden hacia la zona de reacción donde predominan los procesos de nucleación. Se observa un valor máximo en las proximidades de la punta de la llama, a un $r=0,64$ mm y a una altura de $z=26,50$ mm siendo $f_s = 1,25$ ppm. Se observa el segundo valor máximo en un radio de $r=1,30$ mm y a una altura de $z=23,50$ mm que es más cercano a la mitad de la llama, siendo $f_s = 1,19$ ppm. Luego, a medida que se disminuye la altura de la llama se observa una reducción del valor de las fracciones en volumen de hollín, con un valor mínimo en la zona óptima a una altura de $z=22,50$ mm, siendo $f_s = 0,76$ ppm.

En las regiones periféricas inferiores y en el cuerpo de la llama, y desde $z=22,50$ mm hasta $z=17,50$ mm las fracciones de volumen de hollín tienden a disminuir como consecuencia del predominio de los procesos de oxidación. Los valores también presentan mayor ruido, especialmente cuando son bajos, debido tanto al proceso de deconvolución aplicado como a las características del Eucaliptus utilizado con 0% de humedad.

5.3.3. Fracción en volumen de hollín para muestras Tamaño N°2

Se procede de manera análoga que para las muestras Tamaño N°1, en donde para este caso la llama se estabiliza sobre la superficie de la muestra y se alcanza el régimen estacionario en aproximadamente $t = 110$ s. Luego, se utilizan las capturas que se muestran en las figuras 27 y 28 para la aplicación de la deconvolución mediante Onion-Peeling, obteniéndose los valores del coeficiente de extinción indicados en la Tabla 1. Finalmente, con la ecuación (37) se obtiene el campo de la fracción en volumen de hollín y sus perfiles radiales.

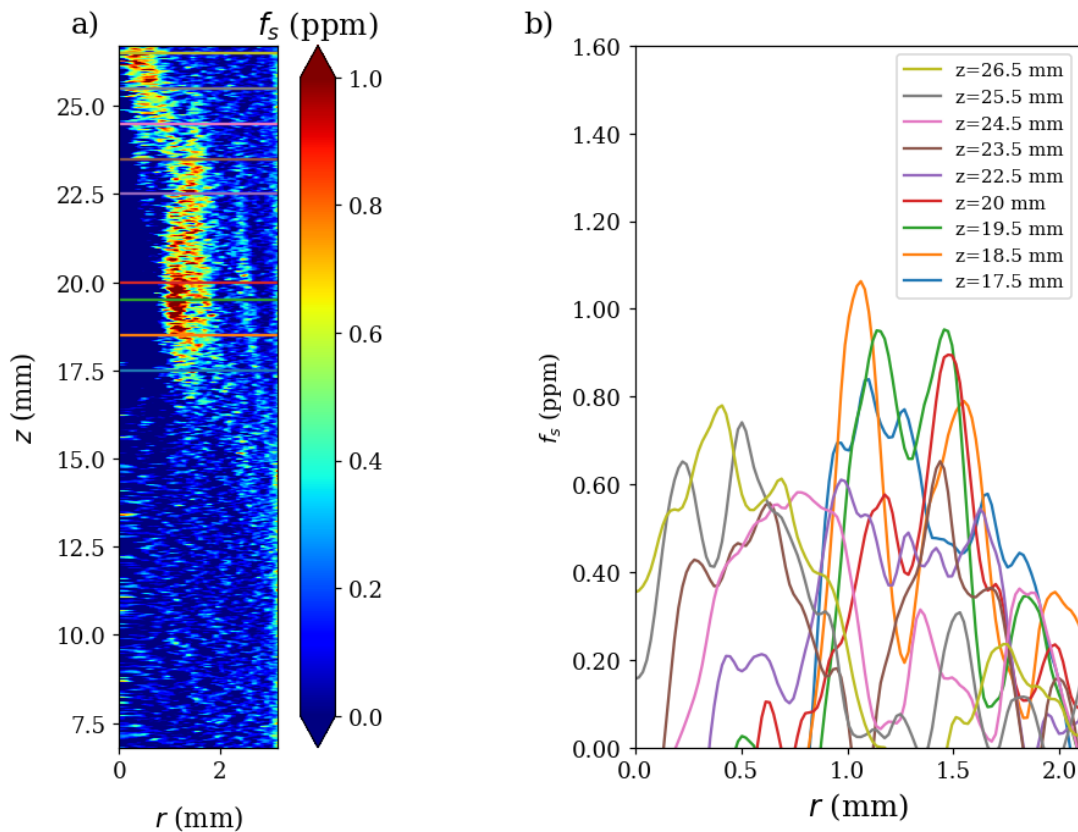


Figura 32: a) Campo de la fracción en volumen de hollín procesada en Python. b) Perfiles radiales de la llama a distintas alturas de estudio.

La figura 32 presenta el campo ajustado de la fracción volumétrica de hollín en la llama, junto con los perfiles radiales correspondientes a diferentes alturas de interés, considerando que se logra una captación de la fracción en volumen de hollín con una concentración mayor a medida que se va descendiendo de la altura $z=22,5$ mm hasta $z=17,5$ mm por el contorno de la llama, de manera opuesta a lo ocurrido con las muestras de Tamaño N°1. Para la interpretación de los resultados de f_s , se considera como altura cero la punta de la llama capturada que se forma al alcanzarse el estado estacionario utilizando la mitad derecha de la llama dada su naturaleza axisimétrica, la cual no es posible apreciar completamente dada la mayor intensidad de combustión de la muestra utilizada, lo que justifica el motivo de necesitar un tiempo de exposición menor al configurado para las muestras Tamaño N°1, presentándose limitaciones en el montaje e imposibilitando la captura total de la llama generada de Tamaño N°2.

Los resultados obtenidos muestran que las mayores fracciones en volumen de hollín se localizan cerca de la mitad e inmediatamente descendente del contorno de la llama, lo cual de manera análoga a lo observado en las muestras de Tamaño N°1, coincide con resultados de otras llamas de difusión bien caracterizadas como las observadas por Escudero et al. (2016). A medida que se incrementa la altura a lo largo del eje de la llama, la fracción volumétrica de hollín disminuye gradualmente, esto debido al predominio de los procesos de oxidación, dado que las partículas concentran la zona de reacción más hacia la parte central y hacia el contorno de la llama, donde predominan los procesos de nucleación, considerando el tamaño de muestras utilizado y que su combustión tiene una mayor intensidad e inestabilidad

que las de Tamaño N°1.

Se observa un valor máximo en las proximidades de la parte central de la llama por el contorno, a un $r=1,06$ mm y a una altura de $z=18,50$ mm siendo $f_s = 1,07$ ppm.

Se observa el segundo valor máximo en un radio de $r=1,15$ mm y también en $r=1,46$ mm, ambos a una altura de $z=19,50$ mm con un $f_s = 0,96$ ppm. Entre una altura de $z=26,50$ mm y $z=22,50$ mm existe una menor concentración de la fracción en volumen de hollín, por lo cual las zonas óptimas se enfocan fuera de este rango entre $z=20,00$ mm y $z=17,5$ mm, que es la parte central del contorno de la llama con la mayor fracción en volumen de hollín.

5.4. Validación

Con el fin de realizar una validación de los valores y campos obtenidos de la fracción en volumen de hollín obtenidos, a partir del estudio realizado por Muñoz-Feutch et al. (2014), quien ocupó hojas de pino, obtuvo valores de f_s menores a 1, ubicando el hollín en mayor parte por el borde de la zona de reacción y en aproximación hacia el centro. Junto con esto, de Yon et al. (2021) se sabe que por el borde exterior del ala de la llama se tienen valores de fracciones en volumen de hollín altos, así como también de Escudero et al. (2016) y de Aphale & DesJardin (2021), estos últimos mediante muestras de PMMA corroboran lo anterior indicando que las mayores concentraciones de hollín coinciden con la caída de la llama al desplazarse hacia la superficie exterior de esta misma, obteniendo valores promedio de f_s para instantes de tiempo a los 45 s, 112 s y 145 s, con valores de fracción en volumen de hollín de 0,9 ppm, 1,7 ppm y 2,1 ppm respectivamente.

Con lo anterior, es posible argumentar que las concentraciones de hollín captadas con el montaje implementado se encuentran dentro de los rangos aceptables, como se puede apreciar en las zonas correspondientes cercanas al borde exterior de la llama captada por el montaje experimental en las figuras 31 y 32.

5.5. Resultados de la experimentación

Como fue señalado anteriormente, en las figuras 31 y 32 se muestran los perfiles radiales correspondientes a distintas alturas de interés, definidas según la captación de la fracción en volumen de hollín en las mediciones, resultando una concentración cada vez mayor cuando se va descendiendo de altura por el contorno de la llama para ambos casos. A continuación, se adjunta una tabla que resume la información resultante de la experimentación, para las muestras de tamaño N°1 y N°2:

Tabla 2: Resumen de valores obtenidos de la experimentación para muestras de Tamaño N°1 y Tamaño N°2.

Tamaño N°1				Tamaño N°2				Variación % de f_s
z (mm)	r (mm)	k_{ext} ($\frac{1}{m}$)	f_s (ppm)	z (mm)	r (mm)	k_{ext} ($\frac{1}{m}$)	f_s (ppm)	
26,50	0,64	8,05	1,25	26,50	0,41	5,02	0,78	38%
25,50	0,82	7,27	1,13	25,50	0,50	4,76	0,74	35%
24,50	1,01	6,31	0,98	24,50	0,77	3,80	0,59	40%
23,50	1,30	7,66	1,19	23,50	1,44	4,25	0,66	45%
22,50	1,35	4,89	0,76	22,50	0,97	3,99	0,62	18%
20,00	0,68	2,51	0,39	20,00	1,48	5,80	0,90	57%
19,50	1,70	2,45	0,38	19,50	1,15&1,46	6,18	0,96	60%
18,50	0,11	3,67	0,57	18,50	1,06	6,89	1,07	47%
17,50	1,96	2,58	0,40	17,50	1,09	5,47	0,85	53%

Para el primer caso, con el montaje implementado fue posible una captación de la llama generada por la muestra de tamaño N°1, considerando que este tamaño se encuentra en el rango óptimo utilizado por otros experimentadores mencionados en secciones anteriores. Con esto, fue posible obtener una fracción en volumen de hollín con el valor máximo de todas las mediciones, siendo de 1,25 ppm. Luego, para el segundo caso tanto por la inestabilidad como por la mayor envergadura de captación requerida por la llama generada por las muestras de tamaño N°2, no fue posible tener una captura total de la llama, motivo por el cual el valor de la fracción en volumen de hollín fue menor que para el primer caso, siendo de 1,07 ppm, es decir, un 14% de diferencia porcentual entre ambos valores.

En la Tabla 2 es posible observar lo mencionado en las secciones anteriores, ya que el rango óptimo para las muestras de Tamaño N°1 es entre $z=26,50$ mm y $z=22,50$ mm; luego, para muestras de Tamaño N°2 el rango óptimo es entre $z=20,00$ mm y $z=17,50$ mm. En promedio, para las muestras de Tamaño N°1 se obtuvo un valor de la fracción en volumen de hollín igual a $f_s = 0,78$ ppm, y para las muestras de Tamaño N°2 se obtuvo un valor de $f_s = 0,80$ ppm.

5.6. Trabajo futuro

Considerando que en el primer caso se capta la zona de reacción donde predominan los procesos de nucleación, siendo esto cercano a la punta de la llama, entonces se deben hacer ajustes en el diseño del montaje experimental, de manera

tal que se cuente con una capacidad de enfoque ajustable para cada tamaño de muestra utilizado, como por ejemplo, la utilización de otra cámara.

También, un factor a considerar es el mecanismo de secado utilizado para las muestras, ya que no es comparable el uso de un Deshidratador de alimentos a un Horno de Precisión de Secado, por lo cual sería interesante la prueba de este montaje con un secado de las muestras por 18 horas continuas en un horno. Estas llamas son generadas a partir de combustibles silvestres y sólidos, es de esperar que la captación y el proceso de deconvolución realizado presente ruido, por lo cual una forma de optimizar este procesamiento es probar diferentes tiempos de exposición, buscando obtener una imagen más nítida en la cual sea posible definir con claridad la naturaleza axisimétrica, sujeto de igual manera al ajuste del diseño mencionado anteriormente y la correspondiente alineación.

Por otro lado, el flujo de aire utilizado es obtenido de un compresor conectado directamente a las líneas del quemador, utilizado solamente una válvula de apertura/cierre como regulador. A comparación de otras muestras, como por ejemplo, las de PMMA, aquellas con origen vegetal presentan un grado menor de intensidad que afecta en su captación, por lo cual una alternativa para esto sería la implementación de un controlador de flujo y la adición de una línea de nitrógeno y oxígeno. En trabajos realizados en la Universidad Adolfo Ibáñez para muestras de PMMA, estas se sometieron a distintas concentraciones de oxidante en el flujo, desde un 19% de oxígeno hasta un 21%, obteniéndose que el incremento del porcentaje de oxígeno produce llamas de mayor intensidad, mayor concentración

de partículas de hollín, mayor altura de la llama y una mayor duración de la combustión, pero lo anterior a costa de una mayor inestabilidad. Por esto, considerando que el presente trabajo fue bajo condiciones atmosféricas y solo con un flujo de aire no regulado, la implementación permitió obtener resultados válidos y dentro de los rangos esperados, por lo cual para un mejor desempeño experimental se debe combinar esta variabilidad de los flujos de oxidante con las muestras de Eucaliptus utilizadas en esta experimentación.

6. Conclusiones

En el presente trabajo experimental y de investigación se llevó a cabo una implementación completa de un montaje experimental capaz de producir llamas de difusión laminar y axisimétricas con un quemador estándar para combustibles silvestres, con el fin de modelar en menor escala la geometría de la llama generada en incendios forestales para llevar a cabo estudios utilizando técnicas no intrusivas.

Mediante la utilización de muestras de Eucaliptus procesadas, tamizadas y estipuladas como Tamaño N°1 y Tamaño N°2, se ejecutó una experimentación con la utilización de la técnica Line-Of-Sight Attenuation (LOSA) buscando la implementación total de un montaje experimental inexistente en el Campus Vitacura de la Universidad Técnica Federico Santa María, el cual fuese capaz de completar un modelamiento de llamas a pequeña escala como las de un incendio forestal, y permitir mediante un procesamiento de imágenes la obtención de la fracción en volumen de hollín a diferentes tamaños de muestras de Eucaliptus, siendo como novedad la utilización de muestras Tamaño N°2, las cuales habían sido descartadas en otros experimentos ópticos similares debido a su tamaño grande.

Lo anterior fue desarrollado con éxito, ya que la implementación del Rack en el Campus Vitacura de la USM permitió la producción de llamas de difusión y la aplicación de la técnica LOSA, y finalmente la obtención de la fracción en volumen de hollín para dos tamaños diferentes de muestras de Eucaliptus.

Esta investigación, además de constituir un avance en la implementación de técnicas ópticas no intrusivas para el estudio de llamas, también aporta un importante precedente en el entendimiento del proceso necesario para lograr un montaje experimental completo, así como también de la generación y comportamiento del hollín en combustibles silvestres. Comprender la formación de hollín a partir de distintos tamaños de muestras de biomasa tratadas, permite realizar una proyección futura para las aplicaciones en el modelamiento y simulación de incendios forestales, entregando herramientas que pueden ser un aporte en la predicción del comportamiento de estos fenómenos y en el diseño de estrategias para prevenir y erradicar estas catástrofes. Así, este trabajo contribuye al desarrollo de conocimiento técnico-científico fundamental para enfrentar uno de los desafíos ambientales más relevantes de nuestro tiempo, junto con un refuerzo en la comprensión de factores físicos en la distribución del tamaño de las partículas y el combustible, los cuales influyen en la estructura de la llama y en la producción de productos de combustión incompleta, así como en la intensidad de la radiación emitida. Estos conocimientos son esenciales para mejorar el modelado de incendios forestales, al reconocer la complejidad de los procesos de transferencia de calor y de formación de contaminantes durante la combustión de vegetación de origen silvestre.

7. Referencias

Åkesson, E., Daun, K. (2008). Parameter selection methods for axisymmetric flame tomography through Tikhonov regularization. *J. Vol. 47(3)*, pp. 407-416. <https://doi.org/10.1364/ao.47.000407>

Aphale, S., DesJardin, P. (2021). Two-color pyrometry based flame to fuel surface radiative heat flux diagnostic using flamelets. *Combustion and Flame*, Vol. 229(111395). <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111395>.

Barros Asenjo, S. (2013). Introducción de especies de Eucalyptus a Chile. Reseña histórica. *Ciencia e Investigación Forestal*, Vol. 19(3), pp. 69-94. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/20697/31230.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chang, H., Charalampopoulos, T., T. (1990). Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 430(1880), pp. 577-591. <https://doi.org/10.1098/rspa.1990.0107>

CONAF (2024). *Chile trabaja en reducción del riesgo de incendios forestales*. <https://www.conaf.cl/chile-trabaja-en-reduccion-del-riesgo-de-incendios-forestales/>

CONAF (2025). *Estadísticas Incendios Forestales 2014-2024*.

<https://lookerstudio.google.com/s/ibfAGZces9A>

Dasch, C. J. (1992). One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods. *Appl Opt.*, Vol. 31(8), pp. 1146-1152. <https://doi.org/10.1364/AO.31.001146>

Daun K.J., Thomson K.A., Liu F., Smallwood, G.J. (2006). Deconvolution of axisymmetric flame properties using Tikhonov regularization. *Appl Opt.*, Vol. 45(19), pp. 4638-4646. <https://doi.org/10.1364/ao.45.004638>.

Escudero, F., Fuentes, A., Consalvi, J.-L., Liu, F., Demarco, R. (2016). Unified behavior of soot production and radiative heat transfer in ethylene, propane and butane axisymmetric laminar diffusion flames at different oxygen indices. *Fuel*, Vol. 183, pp. 668-679. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.126>.

Fuentes, A., Legros, G., Claverie, A., Joulain, P., Vantelon, J.P., Torero, J.L. (2007). Interactions between soot and CH* in a laminar boundary layer type diffusion flame in microgravity. *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31(2), pp. 2685–2692. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.08.031>

Glückert, U.L., Schmidt, R. (2001). Pyrometry and Thermography. En F. Mayinger y O. Feldmann (Eds.) *Optical Measurements: Techniques and Applications* (2da ed., pp. 271-300). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56443-7_14

Hadef, R., Geigle, K., Zerbs, J., Sawchuk, R., Snelling, D. (2013). The concept of 2D gated imaging for particle sizing in a laminar diffusion flame. *Appl. Phys. B.*, Vol. 112, pp. 395–408. <https://doi.org/10.1007/s00340-013-5507-1>

Jenkins, T., Hanson, R. (2001). Soot pyrometry using modulated absorption/emission. *Combustion and Flame*, Vol. 126(3), pp. 1669–1679. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(01\)00278-4](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(01)00278-4)

Legros, G., Wang, Q., Bonnet, J., Kashif, M., Morin, C., Consalvi, J. L., Liu, F. (2015). Simultaneous soot temperature and volume fraction measurements in axis-symmetric flames by a two-dimensional modulated absorption/emission technique. *Combustion and Flame*, Vol. 162(6), pp. 2705–2719. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.04.006>

Ling, T., Chen, G., Hossain, M. M., Qi Qi., Zhang, B., Xu, C. (2024). Flame soot absorption coefficient and temperature reconstruction through line-of-sight attenuation and light field imaging. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 178(108219). <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108219>.

Martínez, C., Malcom Bonet, J. L., Inzunza, S., Guerrero, N., Román, R., Acevedo, R., Araya, E. (2024). *Incendios 02 y 03 de febrero De 2024, Viña Del Mar (Región de Valparaíso)*. En (pp. 79): CIGIDEN.

McAllister, S., Chen, J-Y., Fernández-Pello, A. C. (2011). Fundamentals of Combustion Processes. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7943-8>

McWethy, D., Pauchard, A., García, R., Holz, A., González, M., Veblen, T., Stahl, J., Currey, B. (2018). Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PLOS ONE*, Vol. 13(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201195>

Modest, M. (2013). *Radiative Heat Transfer*. (3ra ed.). Academic Press.

Muñoz-Feucht, K., Fuentes, A., Consalvi, J.L. (2014). Soot volume fraction measurements in a forest fuel layer. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 56, pp. 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.11.007>

Niessner, R. (2014). The many faces of soot: characterization of soot nanoparticles produced by engines. *Angew Chem Int* Vol. 53(46), pp. 12366-12379. <https://doi.org/10.1002/anie.201402812>

Núñez, T. (2022). Incendios forestales en Chile: fenómenos cada vez más frecuentes, severos y extensos. *Núcleos de Investigación de Excelencia, UACH*. <https://nucleos.uach.cl/noticias/post.php?s=2022-01-06-incendios-forestales-en-chile-fenomenos-cada-vez-mas-frecuentes-severos-y-extensos>

Ortiz, D. (2022). Incendios forestales en Chile han acabado con el equivalente a 50 mil estadios nacionales de bosque en los últimos 20 años. *Interferencia*. <https://interferencia.cl/articulos/incendios-forestales-en-chile-han-acabado-con-el-equivalente-50-mil-estadios-nacionales-de>

Peters, N. (1984). Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol 10(3), pp. 319–339. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(84\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0360-1285(84)90114-X)

Severino, G., Cabrera, A., Contreras, J., Pinto, P., Cruz, J.J., Fuentes, A. (2020). A new burner to characterize laminar diffusion flames generated from wildland fuels. *Fire Safety Journal*, Vol. 114(102947). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102947>

Schwarz, A. (1996). Multi-tomographic flame analysis with a schlieren apparatus. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7(3), pp. 406-413. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/3/023>

TechieScience Core SME (2022). *Combustion Temperature: Unveiling The Science Behind High Heat Reactions*. <https://techiescience.com/combustion-temperature/>

Tec-Science. (2020). *Thermodynamic derivation of the Stefan-Boltzmann Law*. <https://www.tec-science.com/thermodynamics/temperature/thermodynamic-derivation-of-the-stefan-boltzmann-law/>

Thomsen, M., Cruz, J. J., Escudero, F., Fuentes, A., Fernandez-Pello, C., Gollner, M., Urban, D., Ruff, G. (2023). Determining flame temperature by broadband two color pyrometry in a flame spreading over a thin solid in microgravity. *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 39(3), pp. 3909-3918. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.07.237>.

Tihay, V., Simeoni, A., Santoni, P.A., Garo, J.P., Vantelon, J.P. (2009). A global model for the combustion of gas mixtures released from forest fuels. *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 32(2), pp. 2575–2582. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.095>

Yon, J., Cruz, J.J., Escudero, F., Morán, J., Liu, F., Fuentes, A. (2021). Revealing soot maturity based on multi-wavelength absorption/emission measurements in laminar axisymmetric coflow ethylene diffusion flames. *Combustion and Flame*, Vol. 227, pp. 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.12.049>.

White, F. M. (2004). *FLUID MECHANICS* (5ta ed.). McGraw-Hill.