



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA



Estudio de sodio y potasio en árboles mediante el análisis de espectros de combustión de su madera para distintas especies, procedencias y cortes estructurales.

POR

Matias Alfonso Espinoza Merino

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniera civil en Telecomunicaciones

Profesor Guía

Dr. Francisco Germán Pérez Venegas

Mayo 2024
Concepción (Chile)

© 2024, Matias Alfonso Espinoza Merino

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Agradecimientos

Cuando pienso en todo el trayecto que he tenido que caminar para llegar hasta aquí, no puedo ignorar toda la ayuda y apoyo que he tenido en este proceso. Este logro no es solo merito mío, sino también de mi familia especialmente de mis padres. Me han dado todas las herramientas necesarias para que pueda llevar a cabo los proyectos que me proponga. Incluso, me apoyaron en la decisión de empezar esta carrera cuando aún no terminaba la que estaba cursando.

Además, gracias a mis amigos y seres queridos he podido seguir adelante a pesar de los tropiezos. Me enseñaron que todo es un constante aprendizaje, y que solo teniendo buena disposición y humildad suficiente se puede rescatar algo de cualquier situación siempre.

Agradecer también a mis profesores de carrera y a mi anterior profesor guía Luis Arias. Tal vez no tuvimos tanta interacción como para conocerlo lo suficiente, pero admiraba como parecía que podía compatibilizar una ocupada vida como la profesional-académica con la personal y familiar; siempre con una sonrisa. Por otra parte, agradecer a mi actual profesor guía Francisco Pérez que tuvo la buena disposición de seguir con mi tutoría para terminar esta Memoria de Título. Además de excelentes profesores y acompañarme en este camino de formación para ser ingeniero son un ejemplo de resiliencia, perseverancia y disciplina. Gracias por todo lo que me enseñaron.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	INTRODUCCIÓN	3
2.2	TRABAJOS PREVIOS	3
3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	7
3.1	OBJETIVOS	7
3.1.1	<i>Objetivo general</i>	7
3.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	7
3.2	ALCANCES	8
3.3	LIMITACIONES	8
3.4	METODOLOGÍA	9
4	MARCO TEÓRICO	10
4.1	ANATOMÍA ARBÓREA	10
4.1.1	<i>Raíces</i>	10
4.1.2	<i>Tronco</i>	12
4.2	ESTRUCTURA CELULAR DE LA MADERA	14
4.3	COMPONENTES QUÍMICOS DE LA MADERA	15
4.3.1	<i>Repercusiones de la concentración de Sodio y Potasio</i>	18
4.4	PROVENIENCIA DE LA MADERA	18
4.5	MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL ESPECTRO DE EMISIÓN EN MADERA	19
4.6	RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	20
4.6.1	<i>Análisis de la radiación: espectroscopía</i>	23
4.6.2	<i>Radiación de cuerpo negro</i>	26
4.6.3	<i>Espectro de la llama</i>	29
5	CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL	31
5.1	INSTRUMENTOS	31
5.1.1	<i>Lampara de calibración HL-2000</i>	31

5.1.2	<i>Espectrómetro FLAME o USB-4000</i>	32
5.1.3	<i>Fibra óptica US/VIS 400um</i>	32
5.1.4	<i>Lente colimador</i>	33
5.1.5	<i>Horno Mufla</i>	34
5.2	MUESTRAS DE BIOMASA	35
5.3	SET-UP.....	38
6	PROCESAMIENTO DE DATOS	41
7	RESULTADOS Y EVALUACIÓN	42
7.1	CALIBRACIÓN	42
7.2	ESPECTROS CALIBRADOS	44
7.3	CONCEPTOS DE UTILIDAD PARA OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	48
7.4	ANÁLISIS DE DATOS	49
7.4.1	<i>Picos de Sodio y Potasio a través del tiempo</i>	52
7.4.2	<i>Métricas de análisis de datos</i>	56
7.4.3	<i>Correlaciones</i>	64
8	CONCLUSIONES	68
9	TRABAJOS FUTUROS	71
10	BIBLIOGRAFÍA	72
11	ANEXO	77

Índice de figuras

FIGURA 4-1: SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA RAÍZ DE DICOTILEDÓNEA. FIGURA ADAPTADA [20].	12
FIGURA 4-2: SECCIÓN HORIZONTAL DEL TRONCO. FIGURA ADAPTADA [20].	14
FIGURA 4-3: ORGANIZACIÓN TÍPICA DE LAS PAREDES CELULARES EN LA MADERA. FIGURA ADAPTADA [21].	15
FIGURA 4-4: (A) CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS. (B) COMPONENTES DEL CAMPO ELÉCTRICO.	21
FIGURA 4-5: ESPECTRO VISIBLE. FIGURA ADAPTADA [45]	22
FIGURA 4-6: ESPECTRO DE EMISIÓN DE MUESTRA DE SALMUERA. FIGURA ADAPTADA [35].	24
FIGURA 4-7: DIAGRAMA DE ENERGÍA DE IONES DE SODIO. FIGURA ADAPTADA [35].	25
FIGURA 4-8: CURVAS DE RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO PARA DIVERSAS FUENTES DE LUZ.	26
FIGURA 4-9: CONTENEDOR QUE SIMULA A UN CUERPO NEGRO. FIGURA ADAPTADA.	27
FIGURA 4-10: RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO A DIFERENTES TEMPERATURAS. FIGURA ADAPTADA.	28
FIGURA 4-11: PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN DE UN TROZO DE MADERA.	30
FIGURA 5-1: LÁMPARA DE CALIBRACIÓN HL-2000.	31
FIGURA 5-2: ESPECTRÓMETRO FLAME.	32
FIGURA 5-3: FIBRA ÓPTICA US/VIS 400UM.	33
FIGURA 5-4:LENTE COLIMADOR 84-UV-25 DE OCEAN INSIGHT.	33
FIGURA 5-5: HORNO MUFLA.	35
FIGURA 5-6: MUESTRAS DE ÁRBOLES.	36
FIGURA 5-7: MUESTRAS DE MADERA DE ÁLAMO LISTAS PARA EXPERIMENTAR.	37
FIGURA 5-8: EJEMPLOS DE NOMENCLATURA.	38
FIGURA 5-9: ELEMENTOS DEL SET-UP A UTILIZAR.	38
FIGURA 5-10: SET-UP EXPERIMENTAL.	39
FIGURA 7-1: VECTOR DE CALIBRACIÓN DE HL-2000.	43
FIGURA 7-2: ESPECTRO DARK.	43
FIGURA 7-3: ESPECTRO PROVENIENTE DE LÁMPARA DE CALIBRACIÓN.	44
FIGURA 7-4: EJEMPLO DE ESPECTRO DE COMBUSTIÓN DE UNA MUESTRA DE ÁLAMO EN EL SEGUNDO 10	45
FIGURA 7-5: ESPECTROS CALIBRADOS DE 1.1.1. NOMENCLATURA EN FIGURA 5.2-3	46
FIGURA 7-6: ESPECTROS CALIBRADOS DE 1.RAI.1. NOMENCLATURA EN FIGURA 5.2-3.	46
FIGURA 7-7: ESPECTROS CALIBRADOS DE 1.COR.1. NOMENCLATURA EN FIGURA 5.2-3.	47
FIGURA 7-8: ESPECTROS CALIBRADOS DE 1.RAM.1. NOMENCLATURA EN FIGURA 5.2-3.	47
FIGURA 7-9: LÍNEA BASE, ALTURAS RELATIVAS Y PICOS.	48
FIGURA 7-10: ALTURAS RELATIVAS DE CADA MUESTRA DE LA PRIMERA SECCIÓN DE TRONCO DEL PRIMER ÁLAMO. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	49
FIGURA 7-11: EJEMPLO DE EXPERIMENTACIÓN CON MUESTRAS NO ESTANDARIZADAS. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	50

FIGURA 7-12: ALTURAS RELATIVAS DE 1.3.4. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.....	51
FIGURA 7-13: ALTURAS RELATIVAS DEL DOBLETE DE NA. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	51
FIGURA 7-14: ALTURAS RELATIVAS DEL DOBLETE DE K. NOMENCLATURA EN LA FIGURA 5-8.....	52
FIGURA 7-15: ALTURAS RELATIVAS DE K DE 1.RAM. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	52
FIGURA 7-16: ALTURAS RELATIVAS DE NA DE 1.RAM. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	53
FIGURA 7-17: ALTURAS RELATIVAS DE NA DE 1.2. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.....	53
FIGURA 7-18: ALTURAS RELATIVAS DE K DE 1.2. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.....	54
FIGURA 7-19: ALTURAS RELATIVAS DE K DE 1.COR. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	54
FIGURA 7-20: ALTURAS RELATIVAS DE NA DE 1.COR. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.....	55
FIGURA 7-21: ALTURAS RELATIVAS DE K DE 1.RAI. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	55
FIGURA 7-22: ALTURAS RELATIVAS DE NA DE 1.RAI. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	56
FIGURA 7-23: ALTURAS RELATIVAS ORIGINALES E INTERPOLADAS DE 2.1.4. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.....	65
FIGURA 7-24: ALTURAS RELATIVAS ORIGINALES E INTERPOLADAS DE 2.RAM.4. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	66

Índice de tablas

TABLA 4-1: REGIONES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO [36].	23
TABLA 7-1: NOMENCLATURA DE CADA PICO DE CADA DOBLETE	45
TABLA 7-2: TABLA DE RESULTADOS DE ÁREA BAJO LA CURVA DE ALTURAS RELATIVAS DEL PRIMER ÁLAMO DE YUMBEL. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	57
TABLA 7-3: TABLA DE RESULTADOS DE ALTURAS PROMEDIO DE LAS ALTURAS RELATIVAS DEL PRIMER ÁLAMO DE YUMBEL. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	58
TABLA 7-4: TABLA DE RESULTADOS DE ÁREAS DE CADA DOBLETE DEL PRIMER ÁLAMO DE YUMBEL. NOMENCLATURA FIGURA 5-8.	59
TABLA 7-5: TABLA DE RESULTADOS DE ÁREA BAJO LA CURVA DE ALTURAS RELATIVAS PARA EL SEGUNDO ÁLAMO DE YUMBEL. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	60
TABLA 7-6: RESULTADOS DE MUESTRAS DE RAMAS DEL SEGUNDO ÁLAMO DE YUMBEL.	61
TABLA 7-7: RESULTADOS DE MUESTRAS DE RAÍCES DEL SEGUNDO ÁLAMO DE YUMBEL.	61
TABLA 7-8: TABLA DE RESULTADOS DE ÁREA BAJO LA CURVA DE LAS ALTURAS RELATIVAS DEL PINO DE YUMBEL. NOMENCLATURA EN FIGURA 5.2-3.	63
TABLA 7-9: TABLA DE RESULTADOS DE ÁREA BAJO LA CURVA DE LAS ALTURAS RELATIVAS DEL EUCALIPTO DE HUALQUI. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	64
TABLA 7-10: TABLA DE CORRELACIONES DE LA TERCERA SECCIÓN DE TRONCO ENTRE DISTINTOS ÁRBOLES. NOMENCLATURA EN FIGURA 5-8.	67
TABLA 11-1: TABLA RESUMEN DE TODAS LAS CORRELACIONES POSIBLES ENTRE TODAS LAS MUESTRAS DE ESTE ESTUDIO.	77

Acrónimos

AES : Atomic Emission Spectrometry

K : Potasio

MdT : Memoria de título

MPT : Microwave Plasma Torch

Na : Sodio

NIR : Near infrared

OES : Optical Emission Spectroscopy

ST : Secciones transversales

UV : Ultravioleta

VIS : Visible

1 Introducción

El concepto de espectro electromagnético es fundamental en la disciplina de ingeniería eléctrica. Se emplea en áreas de comunicación, astronomía, aplicaciones médicas, aplicaciones militares, etc. En concreto es fundamental en la ingeniería en telecomunicaciones porque brinda las herramientas necesarias para la transmisión de información a través de ondas electromagnéticas y es la base de muchas tecnologías de comunicación modernas.

Uno de los métodos que se tiene para medición de ondas electromagnéticas es mediante la espectroscopia. Dentro de ésta, se tienen diferentes técnicas las cuales se enfocan en regiones específicas del espectro, en algún fenómeno físico de la materia a estudiar o en alguna forma de observar las representaciones de dichos fenómenos físicos. Una de estas técnicas es la espectrometría mediante el espectro de emisión, que analiza la radiación emitida por átomos o moléculas excitados.

Cuando un material o un elemento se calienta con una fuente de energía como un láser o una llama, los electrones de los átomos que los conforman pueden saltar a niveles de energía más altos. Al volver a sus niveles de energía más estable, la energía es emitida en forma de fotón. La longitud de onda de la radiación emitida de dicho fotón está directamente relacionada con la diferencia de energía entre los niveles de energía inicial y final de los electrones. Cada elemento químico tiene un conjunto único de niveles de energía y, por lo tanto, emite un conjunto característico de longitudes de onda en su espectro de emisión. Este espectro específico son las llamadas líneas espectrales [1].

En general, se tiene que el espectro entrega indicadores de la naturaleza y composición de determinada muestra orgánica o inorgánica. A esta representación se le llama “firma espectral” y es propia de la esencia de la sustancia a estudiar. Esta puede ser representada como espectro de emisión que se refiere al conjunto de longitudes de onda emitidas por un átomo, molécula u otra sustancia cuando se encuentra en estado excitado; cuando sus electrones excitados vuelven a sus estados originales, liberan energía en forma de radiación. También puede ser representada por un espectro de absorción que igualmente se refiere a un conjunto de longitudes de onda, pero que son absorbidas por una sustancia cuando es irradiada con luz blanca o de otro tipo.

Para identificar la “firma espectral” de la madera, existen una gran cantidad de métodos como la espectroscopia infrarroja (IR), la espectroscopía de reflectancia difusa o la espectrometría de masas.

La medición del espectro de emisión en el contexto de la combustión de madera es una técnica que se ha utilizado para estudiar la naturaleza y composición de los árboles, además de comprender los procesos químicos y físicos que ocurren durante su quema [2]. Los estudios iniciales de esta materia se remontan al siglo XIX, con el objetivo de comprender los procesos de la quema de materiales sólidos. Los científicos observaron que cuando se quemaba madera se generan emisiones de luz y calor, centrándose en la observación cualitativa de las llamas [3]. Ya en el siglo XX y junto con los respectivos avances tecnológicos, los investigadores comenzaron a utilizar técnicas más sofisticadas para analizar la luz emitida por determinada fuente, además de usar otros medios de excitación de fuentes como láseres [4] y la antorcha de plasma de microondas (*microwave plasma torch*, MPT) [5].

Todos los avances permitieron la identificación de elementos químicos presentes en la llama y junto con esto, la espectroscopia de emisión se convirtió en una valiosa herramienta para determinar composición química. Incluso, se han desarrollado arreglo de detectores, permitiendo el análisis simultáneo de múltiples elementos en un amplio rango de longitud de onda [6]. Hoy en día la espectroscopia de emisión óptica es un poderoso método de diagnóstico que ha proporcionado herramientas no invasivas para la caracterización de propiedades del plasma como su densidad, temperatura y diferentes poblaciones de partículas neutras e ionizadas que constituyen dicho plasma [7].

En este estudio se utilizará el termino de *Optical Emission Spectroscopy* (OES) y *Atomic Emission Spectrometry* (AES) de forma análoga, como método para obtener el espectro de emisión de muestras de biomasa. Se obtiene información de distintos tipos de árboles originados en distintos lugares utilizando el método OES dentro del rango del espectro visible, analizando los picos de emisión de Sodio (589nm aproximadamente) y Potasio (770nm aproximadamente). Con un set-up que incluye: un computador con software SpectraSuite, fibra óptica US/VIS 400mm, lampara de calibración HL-2000, espectrómetro Flame, lente colimador y horno mufla. Se analiza el comportamiento que tiene el Sodio (Na) y el Potasio (K) a lo largo de la estructura de distintos árboles. Dicha estructura involucra distintas secciones del tronco, raíces, corteza y ramas. Además, se estudian las semejanzas espectrales entre de distintas o misma especie, provenientes de un mismo o distinto lugar.

2 Revisión Bibliográfica

2.1 Introducción

Se proporciona una perspectiva panorámica del estado del arte de la temática a abordar y de las investigaciones presentes que están relacionadas con este estudio. Mediante la revisión de fuentes académicas, estudios científicos y otras publicaciones, se busca consolidar el conocimiento existente en torno a la emisión de sodio y potasio en la madera.

2.2 Trabajos Previos

La espectroscopia de emisión óptica OES o mejor conocida como espectroscopia de emisión atómica AES (para los casos donde la fuente de luz viene dada por la excitación de la muestra mediante combustión) ha experimentado varios desarrollos clave a lo largo de la historia. Desde observaciones simples hasta aplicaciones más sofisticadas usando técnicas espectroscópicas y equipos modernos.

Los primeros indicios de medición de espectro de combustión de biomasa se remontan al siglo XIX, cuando científicos notaron que, al quemar madera u otros materiales, se generaba luz y calor. Esto despertó el interés de comprender como se originaba esta emisión durante el proceso de combustión. En 1814, Fraunhofer observó líneas espectrales debidas a la absorción en el espectro solar, marcando la primera observación de este fenómeno [8]. Luego en la década de 1850, Robert Bunsen y Gustav Kirchhoff realizaron experimentos que sentaron las bases de la espectroscopia moderna. Observaron la luz emitida por las llamas de diferentes sustancias y descubrieron que cada elemento químico producía líneas espectrales características. Este descubrimiento permitió la identificación de elementos químicos a través de su espectro de emisión mediante la excitación de átomos durante la combustión [8].

Posteriormente el uso coordinado de múltiples fuentes de energía como láseres y campos eléctricos mejoró el seguimiento y control de los procesos espectroscópicos dando lugar a espectros de emisión óptica de mejor calidad [9]. Además, el desarrollo de la espectroscopia de emisión Mossbauer con varios isotopos permitió la investigación de efectos electrónicos u procesos de condensación de Bose en superconductores de alta temperatura [10]. En general, estos avances han contribuido a la comprensión y aplicación de la espectroscopia de emisión atómica en diversos campos de la ingeniería.

Ya en el siglo XX y XXI, los sensores y detectores mejoraron significativamente. Esto permitió mediciones más precisas, una mejor resolución espectral y mediciones con intensidades más bajas. La espectroscopia de emisión entonces encontró aplicaciones en la investigación de la combustión, específicamente en la investigación de la quema de madera. En esta área se han hecho varios avances y establecidos precedentes experimentales como en Mooktzeng Lim, et al. [11], donde se informa que los sulfatos alcalinos K_2SO_4 y Na_2SO_4 se condensan a temperaturas inferiores a $950^\circ C$, mientras que los cloruros alcalinos KCl y $NaCl$ se condensan a temperaturas inferiores a $600^\circ C$. Esto entrega información de la temperatura necesaria que se tiene que alcanzar, para que los compuestos de K y Na se ionicen, se conviertan en vapor y contribuyan a la formación de la llama. De esta forma al observar la flama se pueda extraer información de estos elementos. Además, según estudios de Fernando Castillo, et al. [12] a los $700^\circ C$ se produce degradación en las moléculas de madera que contienen Na y K para su posterior observación.

Un precedente importante es el planteado por Lim et al. [11], donde estudian el espectro de emisión de la combustión de biomasa que se producía en calderos. Proceden a escoger el pico con mayor intensidad de los dobletes de cada elemento de Na y K para el algoritmo de proporción Na/K que emplean. Además, plantean que a pesar de que se puedan obtener distintas intensidades de los picos, tal como, por la diferencia en tiempo de integración que se utilice al adquirir los datos, conlleva a obtener las mismas proporciones de Na/K debido a que varían de forma proporcional sus intensidades. Se estudia el contenido de los elementos de Na y K que se encuentran en los depósitos de ceniza y en los vapores que emite la combustión. Se concluye que, para determinar el contenido real de los elementos mencionados se necesita una mayor experimentación y que dichos experimentos se efectúen de mejor manera y de forma más controlada. Sin embargo, el método propuesto en el estudio podría utilizar la relación Na/K de los espectros de emisión atómica como indicador tentativo in situ.

A medida que una muestra de biomasa se quema, el Potasio que se encuentra en ella puede ser liberado a su fase gaseosa o ser retenido en su fase condensada en forma de partículas de ceniza. Las partículas de K en forma de gas posteriormente son condensadas en la superficie del recipiente donde ocurrió la combustión (generalmente calderas) donde pueden producir una reacción de corrosión. También pueden recombinarse con otras partículas y generar ceniza [13]. Que se encuentre en fase gaseosa o solida depende de la temperatura en la que se encuentre la combustión. Según estudios de Knudsen et al. [14] se obtienen diversas medidas de Potasio según la temperatura en la que se encuentra la combustión de la biomasa. Donde a temperatura bajo los $1000^\circ K$ ($726,85^\circ C$) se obtienen niveles de

concentración de gas de Potasio relativamente bajos, lo que conlleva a tener niveles altos de K en las cenizas. A medida que aumenta la temperatura se obtiene mayor concentración de K en fase gaseosa hasta alcanzar los 1600K (1326,85°C), donde se consigue el punto de ebullición a presión estándar. La inferencia es que se espera que la combustión total de partículas de estos combustibles de biomasa a temperaturas elevadas (>1600 K) dé como resultado que la mayor parte del potasio entre en la fase gaseosa [14].

Una investigación hecha por Mason et al. [15] sobre la combustión de muestras de madera con distintas concentraciones de Potasio arrojó interesantes indicaciones. Los perfiles de emisión espectral de K parecen cumplir con una forma general en la que el pico de liberación del elemento ocurre cerca o en el momento en el que se produce una quema efectiva de la muestra, seguido por una rápida disminución en forma exponencial a medida que se libera el Potasio restante. Además, dado que hay ruido en las señales que se registraron y variaciones entre las muestras, para producir un perfil “típico” o más representativo, se debieron tomar datos de múltiples experimentos y derivar un promedio. La diferencia media entre los datos medidos y la señal promediada varió para diferentes materiales hasta $\pm 8\%$ debido a la variabilidad en las muestras. En todos los casos se obtuvieron datos de entre 3 y 6 muestras. Se utiliza este antecedente para recolectar datos usando 4 muestras de cada experimento para esta Memoria de Título.

Otros puntos importantes mencionados en el estudio de Mason P. et al. [15] es que la intensidad de la emisión espectral del Potasio está determinada por la cantidad de átomos en estado excitado, que es función de la temperatura. Se supone que la temperatura de la llama es constante, por lo que la temperatura de las partículas de Potasio es constante. Por lo tanto, se considera que la emisión espectral es proporcional a la concentración de Potasio volatilizado en la llama. Dado esto, se analizaron los datos para determinar la concentración de la liberación total de K observada (área bajo la curva de cada perfil), la tasa de liberación máxima (punto máximo en cada curva de perfil) y la duración de la combustión (tiempo de agotamiento).

En la presente Memoria de Título no se puede calcular la concentración de la liberación de Potasio; los datos que se obtienen están en un gráfico de espectro de emisión de irradiancia absoluta, donde el eje Y está en unidades radiométricas $\frac{\mu W}{nm \cdot cm^2}$ y el eje X indica longitud de onda en nm .

El resultado de integrar el área bajo la curva es la energía radiante total emitida en el rango de longitud de onda integrado, expresada en microwatts por centímetro cuadrado $\frac{\mu W}{cm^2}$.

En la literatura se pueden encontrar métodos para identificar el origen de la madera, como, por ejemplo, el análisis químico, la dendrocronología (estudio de los anillos de crecimiento para determinar la edad y origen geográfico de la madera), la morfología de la madera y la observación de características específicas de la madera como la presencia de ciertas especies de insectos. Hay estudios espectrales como el realizado por Ananías et al. [16] donde menciona un análisis calorimétrico y espectroscópico en el que se tomaron mediciones de coordenadas calorimétricas y espectrales de varias especies de madera. También se tiene el estudio realizado por Pastore [17] donde se describe el uso de la tecnología NIR para crear un banco de espectros del infrarrojo cercano de maderas de diferentes especies y orígenes. En una investigación de A. Sandak et al. [18], se estudió la procedencia de la madera en NIR, pero no hay trabajos realizados usando el espectro visible con líneas de emisión de Na y K [19].

3 Definición del problema

El entendimiento del estado nutricional de un árbol es fundamental para conocer su salud. Actualmente, no se tiene un procedimiento que brinde información rápida de la cantidad de Sodio y potasio, y la distribución de estos elementos que existe a lo largo de la estructura de un árbol. Los métodos que existen son análisis químicos que son costosos y de larga duración.

La identificación de la especie y lugar de proveniencia de la madera es crucial para combatir la tala ilegal y promover una gestión sustentable de los recursos forestales. Sin embargo, existen muy pocos métodos para determinar dicha información. Los que hay, son en la banda NIR que requieren espectrómetros más costosos en comparación a los requeridos para el espectro visible. Además, hay pocos estudios al respecto y solo con determinadas especies.

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo general

Analizar el espectro de emisión de Na y K de la combustión de muestras de madera de árboles de distintas especies; en distintos lugares de procedencia y a lo largo de la estructura de un árbol. El método propuesto, mediante medición del espectro de emisión, puede brindar información concluyente de cómo se comporta el Sodio-Potasio a largo de un árbol, para que posteriormente se pueda analizar el estado de árboles, teniendo el conocimiento de que dependiendo de donde se obtengan las muestras se puede obtener distintos resultados. Además, el obtener relaciones espectrales entre árboles, ya sea porque pertenecen a la misma especie o porque pertenecen al mismo lugar de origen, ayudaría a identificar de que árbol es determinada madera en cuestión o de donde proviene, respectivamente. Esta investigación se llevará a cabo mediante recolección, secado y quema de diferentes muestras estandarizadas en tamaño y humedad, para su observación mediante el espectrómetro FLAME y posterior análisis.

3.1.2 Objetivos específicos

1. Desarrollo de set-up para la medición del espectro de combustión de muestras de madera.

2. Desarrollo de procedimiento para la calibración de espectrómetro FLAME, para la conversión de cuentas a unidades radiométricas.
3. Recolectar espectros de emisión de irradiancia absoluta mediante el set-up propuesto.
4. Implementar métricas como el cálculo de alturas relativas (se explicará este concepto más adelante), para el análisis de los espectros recolectados
5. Analizar la emisión de Na y K en distintas partes de un árbol y relacionar el espectro de árboles de la misma especie o de diferentes especies, localizadas en el mismo lugar o en distintos lugares.

3.2 Alcances

Se analizarán las muestras de 6 árboles: 2 álamos de Yumbel, 1 pino de Yumbel, 1 eucalipto de Hualqui, 1 álamo de Yungay y 1 roble de Linares. En relación con los 4 primeros árboles, se extraerán muestras de distintas secciones de su tronco, raíces, ramas y corteza.

Se obtendrán los espectros de emisión de la combustión de las muestras, analizando los picos de Na y K. Se extraerán 4 muestras de cada sección del árbol que se esté analizando para que el resultado sea más representativo y estadísticamente más confiable. Se efectuará un procesamiento de señales para finalmente obtener los resultados de cada experimento y sus análisis.

3.3 Limitaciones

Este proyecto posee limitaciones tanto en la toma de muestras como en su análisis.

1. La obtención de muestras de madera en buenas condiciones en distintas partes del árbol es un desafío, debido a que es necesario tener las herramientas pertinentes y no es posible talar cualquier árbol en cualquier lugar. Esto hace que se vea limitado el acceso de muestras de varios árboles en lugares distintos. A causa de esto, los resultados del presente estudio pueden no llegar a ser lo suficientemente robustos.
2. La no homogeneidad química y biológica, incluyendo la concentración de Na y K a lo largo de la estructura de un árbol, puede conllevar a obtener resultados distintos dependiendo del lugar específico donde se extraigan las muestras.
3. La disposición de la configuración física del set-up repercutirá en los resultados obtenidos. Tal como la posición del lente colimador y su distancia con el horno mufla, influenciarán en la

magnitud de la irradiancia obtenida. Haciendo problemático recrear exactamente las mismas condiciones para experimentos en distintos días.

4. El análisis de solo 2 elementos presentes en la madera puede que no sea suficiente para concluir trazabilidad de los árboles ni comportamiento de sus diferentes secciones.

3.4 Metodología

Primeramente, se realiza una revisión bibliográfica para tener conocimiento de si se ha realizado trabajos semejantes o análogos a este. Luego, se procede con la obtención de los datos. La metodología para ello se detalla a continuación:

1. **Recolectar la madera** de cada uno de los árboles requeridos.
2. **Estandarizar las muestras; se normaliza el tamaño** de las muestras con una dimensión de 1[cm]x1[cm]x2[cm]; **se secan las muestras** en el horno a 130° durante 5 horas justo antes de incinerarlas, para obtener los mejores resultados en relación con la humedad de la madera y una combustión más limpia. De esta forma se logra alcanzar aproximadamente el 0% de humedad.
3. **Se configura un set-up** para medir espectroscopia de emisión atómica que incluye un computador, el espectrómetro FLAME que cubre el espectro visible, un lente colimador con su respectivo soporte, un cable de fibra óptica UV-VIS de 400[nm] y la lámpara de calibración.
 - 3.1. Se calibra el espectrómetro para obtener resultados en unidades radiométricas, en vez de solo en cuentas.
4. **Obtención de espectros de emisión** de la combustión de cada muestra de madera, con una frecuencia de recolección de datos dada por el tiempo de integración que se configure en el espectrómetro
5. **Análisis de los picos de sodio y potasio** de cada árbol. Esto se hará con métricas como la medición de las alturas relativas (distancia entre el pico y el espectro continuo) de cada espectro.
6. **Usando correlaciones, encontrar** (si es que existe) **relación** entre árboles de la misma especie o entre árboles talados en el mismo lugar geográfico.

4 Marco teórico

En esta sección se presenta la base teórica en la cual, se sustenta la presente Memoria de Título (MdT). Se analiza el rol y distribución que tiene el Na y K a lo largo de un árbol, junto con la estructura de este último. Se detallan los mecanismos de absorción de nutrientes que tiene un árbol. Se describen los factores que determinan las diferencias de concentración de Na y K que hay entre árboles. Se precisa las características químicas que tiene una muestra de biomasa de madera y como la variabilidad en la composición de diferentes tipos de biomasa afecta la combustión y las emisiones resultantes.

Además, se indican los principios de la base teórica del espectro de una llama y de la combustión de una muestra de madera. Se examina los procesos físicos y químicos involucrados en la combustión de biomasa, desde la descomposición de los componentes hasta la liberación de gases y partículas. Se analiza cómo factores como la temperatura, la presión y la velocidad de combustión afectan el espectro de emisión.

4.1 Anatomía arbórea

Para entender la distribución de Na y K a lo largo de un árbol y que rol cumple en cada una de sus partes, es importante el conocimiento de la estructura interna y de las partes constitutivas de un árbol, las cuales, son importantes para el entendimiento integro de su funcionamiento. En este apartado se analiza cómo están organizadas las diversas partes de un árbol y como interactúan entre sí para el funcionamiento global de la planta. A continuación, se van a exponer las partes que fundamentalmente constituyen a un árbol.

4.1.1 Raíces

Es el órgano subterráneo que da sostén a toda la estructura y su función es la absorción de los componentes que necesita, entre ellos el Na y K. Estructuralmente se pueden dividir en monocotiledóneas y dicotiledóneas (el cotiledón es la primera hoja o conjunto de hojas que emerge de una semilla durante la germinación). Las primeras las raíces son fibrosas y no tienen una raíz principal dominante, en cambio, las raíces dicotiledóneas son pivotantes, profundas y tienen una raíz principal (además suelen tener una mayor capacidad de almacenamiento de nutrientes) [20].

Adicionalmente, las raíces de cualquier árbol se pueden dividir en raíces primarias y raíces adventicias:

- Raíces primarias: Sus funciones incluyen anclar la planta al suelo, absorber agua/nutrientes y servir como almacén [20].
- Raíces adventicias: Surgen de partes de la planta que no son las raíces primarias ni la cofia radicular (estructura protectora que recubre la punta de la raíz en el extremo de crecimiento). Se pueden desarrollar a partir de tallos, hojas u otras estructuras no radiculares. Entre sus funciones se encuentran soportar la planta, mejorar la estabilidad o aumentar la absorción de nutrientes [20].

Dentro de la estructura interna de los tejidos y órganos de un árbol se tienen algunas componentes constitutivas principales. Estas son importantes de mencionar para entender su funcionamiento y como se comunican entre ellas para desarrollar las actividades que ocurren dentro de la planta.

- Epidermis: También conocida como epiblema, rizodermis o capa pilífera. Esta capa es la más externa y está formada por células alargadas que se extienden en los pelos radiculares (estructuras especializadas que se originan en la zona de crecimiento de las raíces y se extienden hacia el suelo circundante para aumentar la superficie de absorción). Está especialmente adaptada para la adquisición de agua y nutrientes [20].
- Cortex: Está formado por células de parénquima (tejido vegetal con células de paredes flexibles y delgadas). Al igual que la epidermis, el cortex cumple la función de absorción de agua y nutrientes. Además, facilita el transporte radial de estas sustancias hacia el sistema vascular [20].
- Endodermis: Es la capa más interna del *cortex*. Se caracteriza por la presencia de las franjas de Casparin, que son barreras impermeables formadas por sustancias como la suberina y la lignina; estas franjas restringen el paso libre de agua y solutos a través de las paredes celulares de la endodermis [20].
- Periciclo: Proporciona el límite exterior de los tejidos vasculares. El periciclo contiene células meristemáticas que tienen la capacidad de dividirse y diferenciarse para dar origen a raíces laterales, lo que aumenta la superficie de absorción de la raíz y su capacidad para explorar el suelo en busca de agua y nutrientes [20].

- Sistema vascular: En esta capa se encuentra la xilema y el floema, que son tejidos encargados del transporte de agua, nutrientes y sustancias fotosintéticas. La xilema transporta agua y minerales desde las raíces hasta otras partes de la planta, mientras que el floema transporta productos fotosintéticos desde las hojas hacia el resto del árbol [20].

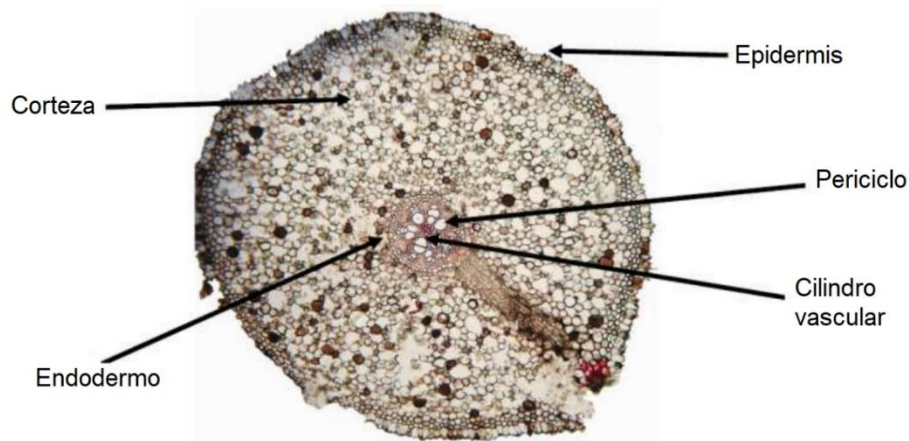


Figura 4-1: Sección Transversal de la Raíz de Dicotiledónea. Figura adaptada [20].

4.1.2 Tronco

En relación con la anatomía del tronco es importante mencionar las capas de crecimiento. Estas capas pueden ser visibles en secciones transversales (ST), como anillos definidos llamados anillos de crecimiento (*growth rings*). Cuando se tienen árboles con crecimiento estacional definidos, el anillo de crecimiento que se forma, pueden llamarse anillo anual [20].

Para entender a cabalidad la composición y desarrollo de un organismo leñoso, se tiene que comprender desde su génesis. En el tejido meristemático (tejido vegetal compuesto por células que tienen la capacidad de dividirse activamente y generar células especializadas que forman los diferentes tejidos de la planta) de los árboles, llamado cambium, que se encarga del crecimiento secundario en plantas leñosas (crecimiento en los árboles que resulta en el aumento en grosor o diámetro de los órganos vegetales, como tallos y raíces), las células madre o células fusiforme se dividen tanto de forma periclinal como anticlinal. En cualquiera de los dos casos, en una división de una célula fusiforme en el cámbium, una de las células hijas generalmente permanece meristemática, lo que significa que tiene la capacidad de seguir dividiéndose y mantener la población de células madre. La

otra célula hija puede diferenciarse en células especializadas, como células de xilema o floema, que son parte de los tejidos conductores de nutrientes en el sistema vascular del árbol [20].

La maduración de nuevas células de xilema implica el crecimiento en diámetro, aumento en longitud y engrosamiento de la pared celular; finalmente esto produce la lignificación. La madera se crea en un entorno variable y está sujeta a control de desarrollo; las células de xilema pueden variar en forma, tamaño, estructura de la pared celular y composición. En condiciones ambientales adversas, como estrés o enfermedad, el crecimiento puede interrumpirse y luego reanudarse, resultando en la formación de una capa de crecimiento adicional denominada falso anillo anual [20].

En cuanto a la estructura de un tronco, se tienen las siguientes partes constitutivas que lo conforman. Cada una cumple un rol fundamental que se explica a continuación:

- **Corteza:** Es la capa externa protectora del tronco del árbol. Protege al árbol de daños físicos, patógenos y desecación. La corteza está compuesta por varias capas, incluyendo el peridermo y el floema secundario [20].
 - **Capas de Peridermo:** capa protectora que reemplaza la epidermis original a medida que el tronco se expande. Está compuesto por varias capas, como el felógeno (células de origen), feloderma (células parenquimáticas internas) y súber (células de corcho externas) [20].
 - **Floema:** es una capa del tejido vascular que forma parte de la corteza. Es responsable del transporte de nutrientes producidos durante la fotosíntesis desde las hojas hacia otras partes de la planta. El floema se encuentra externamente al cámbium vascular [20].
- **Cámbium vascular:** Es un meristemo lateral que se encuentra entre la xilema y el floema. Es responsable del crecimiento secundario del tronco, produciendo nuevas capas de xilema hacia adentro y nuevas capas de floema hacia afuera. El cámbium vascular contribuye al aumento en grosor del tronco [20].
- **Xilema:** Se desarrolla durante el crecimiento secundario de la planta que implica el engrosamiento del tronco y las raíces; esto es característico de las plantas leñosas. Este se ubica en la parte central del tronco [20]. En esta capa se encuentran dos componentes:
 - **Albura:** Es la parte activa externa de la xilema, que se ocupa del transporte de agua y nutrientes desde las raíces hasta el resto del árbol. Está compuesta por células vivas

activas de parénquima; estas pueden almacenar nutrientes y contribuir en el transporte de sustancias [20].

- Duramen: Es la parte más interna de la xilema. Se ubicada en el centro del tronco. A medida que las células envejecen, dejan de funcionar y mueren, formando el duramen. Dado esto, es la madera más vieja del árbol, no circula savia a través de él y sirve como soporte estructural [20].

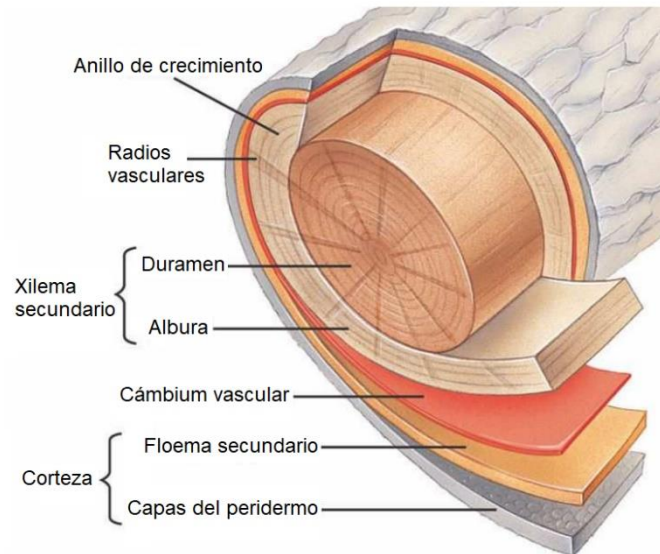


Figura 4-2: Sección horizontal del tronco. Figura adaptada [20].

4.2 Estructura celular de la madera

Las paredes celulares de la madera se dividen en **primarias** y **secundarias**, donde la pared primaria es una estructura delgada de grosor aproximado de 100 nm, mientras que la pared secundaria es más gruesa e inelástica, subdividiéndose en tres capas: S1, S2 y S3 [21]. La capa S1 es la capa más delgada y la que se encuentra al exterior de la pared celular, representando el 5-10% del grosor total. La capa S2 representa el 75-85% del grosor total, siendo la capa más gruesa, y por ende es la que proporciona el soporte mecánico. Por último, la capa S3 corresponde a la capa más interior, y a la más delgada de las tres [21].

La **pared celular primaria** es delgada y elástica, y está compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa, pectinas y proteínas estructurales. Esta pared facilita el crecimiento celular, y las funciones destinadas a la conexión entre células y el reconocimiento de moléculas extrañas [21].

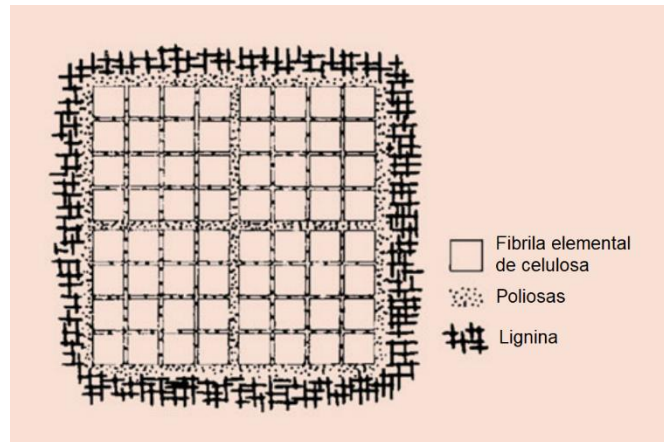


Figura 4-3: Organización típica de las paredes celulares en la madera. Figura adaptada [21].

La **pared celular secundaria** es más gruesa, y contiene celulosa, hemicelulosas y lignina, cuya proporción varía según la especie y el tipo celular. La lignina, que constituye entre el 10% y el 25% de la materia seca total de la planta, se encarga de la protección contra patógenos e insectos. En esta pared, la celulosa puede llegar a representar hasta el 40% de la masa seca, y las hemicelulosas entre el 20% y el 40% [21].

4.3 Componentes químicos de la madera

Ya en los estudios de Patrick E. Mason, et al. [15] se analizó que a medida que la concentración de Potasio aumentaba en las muestras de madera combustionadas, el tiempo total de incineración de la muestra disminuía. Esto se produce debido al efecto catalítico que tiene el K, por lo que se reduce el tiempo en el cual el elemento puede volatilizarse y difundirse lejos. Además, la volatilización de la ceniza que contiene concentraciones de K produce efectos de corrosión en las calderas industriales donde ocurren procesos de combustión de madera [11]. Por lo que el conocimiento del contenido y naturaleza de la química de la madera es importante para entender cómo se comporta la combustión de la madera y su interacción con diferentes tipos de tratamientos de procesos industriales. Asimismo, ayuda a tener mejor claridad en las experimentaciones de espectroscopia de emisión óptica. Químicamente, se puede dividir la madera en 3 componentes principales:

- Celulosa: conforma la estructura primaria y forma hasta 45% de su composición. Es un polímero orgánico lineal compuesto de elementos de glucosa conectadas por enlaces β 1,4glicosídicos. Estas cadenas se organizan en fibras microfibriles, que proporcionan resistencia y rigidez al árbol. En el contexto de la combustión, la celulosa se descompone, liberando energía y componiendo el patrón de emisión espectral de la madera [21].
- Hemicelulosa: es un polímero heterogéneo amorfo. Conformar entre el 25% y el 35% de la madera y se compone de azúcares como xilosa, manosa y galactosa. La hemicelulosa actúa como un material de relleno entre las fibras de celulosa y lignina, aportando a la flexibilidad y a la capacidad de retención de agua de la madera. Durante la combustión, este componente se descompone a temperaturas más bajas que la celulosa y la lignina, liberando compuestos volátiles [21].
- Lignina: es un polímero tridimensional complejo que constituye entre el 15% y el 30% de la madera. La lignina está compuesta por unidades fenólicas como el coniferyl, el sinapyl y el alcohol p-coumaryl. Proporciona características como rigidez, impermeabilidad y resistencia a la madera. En el proceso de la combustión, este compuesto se descompone a temperaturas más elevadas contribuyendo a la fase sostenida de la llama. Su descomposición afecta a los patrones espectrales, en partículas al rango infrarrojo [21].

Además de estos componentes principales, se tienen los llamados “extractos de madera” como taninos, resina, aceites esenciales, etc. Estos son componentes orgánicos de bajo peso molecular que pueden influir en propiedades de la madera como el color, la durabilidad (resistencia a la descomposición), densidad y resistencia. Algunos de los extractos no se distribuyen homogéneamente en los lúmenes y las paredes celulares de todo el tejido de la madera, sino que se encuentran en canales especiales de resina [21].

En cuanto a la composición química exacta de aboles, varía según el tipo de especie de árbol, variedad, origen, ubicación geográfica, edad del tronco, posición en el árbol (albura o duramen), clima y condiciones del suelo. Incluso varía según el sector del árbol que se esté analizando, debido a las diversas funciones que tiene cada parte del árbol [21]. Sin embargo, no hay estudios que analicen el contenido de emisión de Sodio y Potasio que hay en distintas secciones horizontales a lo largo de la altura de un árbol, que es uno de los objetivos generales que cubre la presente Tesis.

De manera general, se tiene que los principales elementos que contienen las sustancias orgánicas de la madera son el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) azufre (S) y fósforo (P), así como los metales calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg). Además, se encuentran otros elementos denominados “elementos traza”. que desempeñan un papel vital en las plantas que se encuentran en cantidades mínimas como lo es el manganeso (Mn), hierro (Fe), sodio (Na), boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu), cloro (Cl), molibdato (Mo), selenio (Se), cobalto (Co) y sílice (Si) [21].

Los minerales constituyen los residuos de cenizas después de la combustión de madera. Por lo tanto, un método para determinar el contenido de mineral es mediante gravimetría después de una pirolisis controlada a 525 C o 900 C [21]. Los elementos catiónicos permanecen en las cenizas en forma de óxidos o carbonatos (como se puede corroborar en [11] y en [15]), mientras que los componentes aniónicos se evaporan en su mayor parte.

Los minerales no se distribuyen homogéneamente en los árboles. Young y Guinn [22] encontraron el contenido de 12 compuestos minerales en varios compartimentos de siete especies de madera en orden decreciente: agujas/hojas > corteza > raíces finas > ramas delgadas > raíces > ramas > madera del tronco. En la presente Tesis, se incluyen muestras de raíces, ramas, corteza y madera del tronco, por lo que sería interesante corroborar el estudio de Young y Guinn con las trazas de Na y K específicamente en caso de obtener buenas emisiones espectrales de todos los tipos de muestras mencionados.

En troncos de abeto (*Picea abies*), se estudió que el contenido de Mg, Mn, Ca, Fe y K fue mayor en la albura que en el duramen. En específico los elementos de Mg y K exhibieron la concentración más alta en el cambium, mientras que la de Ca fue más alta en el floema en desarrollo [23]. En relación con la albura del roble (*Quercus petraea*) se estudió que tenía más Mn, Mg, Ca, K y oligoelementos (elementos traza) que el duramen, mientras que hacia el cambium se produjeron mayores contenidos de elementos (mayor actividad biosintética). Además, se encontraron mayores cantidades de Mn, Mg y Ca divalentes en la base del tronco, mientras que Na y K monovalentes exhibieron concentraciones más altas en las partes superiores del árbol [24].

La importancia de una óptima nutrición de minerales en un árbol repercute directamente en su salud y fisiología (he ahí una de las contribuciones prácticas que tiene esta Tesis). En específico Patricia Battie-Laclau, et al. [25] investigó como un suministro de Na y K pudo mejorar la fotosíntesis en las hojas de árboles *Eucalyptus grandis*. Las tasas de asimilación de CO₂ fueron dos veces mayores en

suministros de K y 1,6 veces mayores en suministros de Na como resultado de una menor resistencia estomática (los estomas son pequeñas aberturas en la superficie de las hojas que permiten el intercambio de gases entre la planta y su entorno) y mesófila (una vez el CO₂ entra a la hoja a través de los estomas, este se disuelve en el agua del tejido interno de la hoja) a la difusión de CO₂ y esto repercute en una mayor capacidad fotosintética. El contenido de almidón de las hojas también mejoró, lo que sugiere que la falta de K perturbó el almacenamiento y transporte del carbono. El área foliar específica, el espesor de la hoja, el espesor del parénquima, el tamaño de las estomas y los espacios aéreos intercelulares aumentaron. Las concentraciones de nitrógeno y clorofila también mejoraron con la adición de Na y K. Este es solo uno de los ejemplos de múltiples investigaciones que hay sobre la repercusión que tiene el Na y K en los árboles.

4.3.1 Repercusiones de la concentración de Sodio y Potasio

El Na y el K son elementos cruciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. El potasio es un macronutriente esencial que desempeña un papel vital en el rendimiento fisiológico de las plantas, especialmente bajo condiciones de sequía. En algunas especies, el sodio puede sustituir al potasio en determinados procesos fisiológicos. Un estudio sobre los efectos de la nutrición de potasio y sodio en el área foliar de árboles de *Eucalyptus grandis* reveló que la aplicación de ambos elementos aumentó el área foliar, extendiendo la longevidad de las hojas y ampliando el tamaño medio de las hojas individuales [26]. Además, se observó una mayor turgencia celular en los tratamientos con K y Na, debido a concentraciones elevadas de osmóticos, lo que incrementó los diámetros de las células del parénquima y el tamaño de las hojas completamente desarrolladas [27].

No obstante, se observó que el tratamiento con Na, el área foliar total intermedia del árbol era comparativamente similar que en los tratamientos con K. Esto podría atribuirse a la capacidad del Na para reemplazar al K en funciones osmorreguladoras. Sin embargo, el Na no logra replicar otras funciones críticas del K, como la de retrasar la senescencia foliar [28].

4.4 Proveniencia de la madera

La combinación de espectroscopía visible y cercana al infrarrojo (Vis-NIR) con métodos quimiométricos ha demostrado ser una estrategia poderosa para determinar la procedencia de la madera de manera rápida, sencilla y no destructiva [29] [30]. Un estudio consultado recogió un total

de 280 muestras de madera de dos orígenes (provincia de Jilin y Heilongjiang, China) y tres especies para análisis de clasificación y predicción. El ruido en los datos espectrales fue removido utilizando la transformada wavelet de elevación (LWT) y se construyeron modelos lineales y no lineales a partir de los espectros utilizando los métodos de mínimos cuadrados parciales (PLS) y *support vector machine* (SVM) optimizada por enjambre de partículas (PSO). El modelo PSO-SVM se empleó para la discriminación del origen y la especie. Los resultados mostraron que la precisión del origen geográfico y la especie fue mayor al 98% para el conjunto de datos de predicción [31].

En otro estudio relevante, se demostró que la técnica FT-NIR es extremadamente sensible para identificar diferencias sutiles en la composición química de árboles de la misma especie, pero de diferentes ubicaciones. Esta metodología podría ser crucial para verificar la procedencia de muestras desconocidas comparándolas con una base de datos de espectros conocidos, lo que facilita el rastreo de la madera y la detección de tala ilegal en áreas protegidas [18].

En el marco del proyecto NIRWOOD, se analizaron especies comerciales importantes en España y algunas especies tropicales para introducir variabilidad. Se recopilieron espectros de 16 especies en 25 aserraderos distribuidos en dos ecorregiones (Atlántica y Mediterránea), utilizando tres dispositivos NIR comerciales. Las técnicas de clasificación y reconocimiento de patrones aplicadas permitieron discriminar con éxito tanto la especie como el origen geográfico de la madera, logrando tasas de clasificación correcta superiores al 90% [29].

Por último, un estudio adicional investigó el potencial de la espectroscopía de infrarrojo medio y cercano para identificar el origen geográfico de las biomásas forestales. Este análisis reveló que la composición química de la madera puede variar significativamente dentro de la misma especie, en función de la ubicación del árbol. Las técnicas espectroscópicas demostraron ser suficientemente sensibles para detectar estas variaciones y clasificar el origen de la madera. Se desarrolló y validó exitosamente un algoritmo de identificación que tiene aplicaciones importantes para rastrear las procedencias de la madera y como herramienta para detectar troncos procedentes de áreas protegidas [19].

4.5 Métodos de medición del espectro de emisión en madera

La espectroscopía de emisión es una técnica que puede ser utilizada para analizar la composición química de la madera. Este método se basa en la detección de la luz emitida por una muestra de madera

cuando es excitada por una fuente de energía externa. La luz emitida, conocida como espectro de emisión, varía según cada elemento químico presente en la madera, permitiendo así su identificación y cuantificación precisa [32]. Algunos métodos de espectroscopia son los siguientes:

1. Espectroscopía de Emisión de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES): Esta técnica utiliza un plasma generado por una bobina de inducción para excitar los átomos en la muestra de madera. La luz emitida por estos átomos excitados es posteriormente analizada para determinar la concentración de elementos tales como el sodio y el potasio [33].
2. Espectroscopía de Emisión Atómica (AES): En esta técnica, se utiliza una fuente de energía como un arco eléctrico o un láser para excitar los átomos en la muestra. La luz emitida por estos átomos se dispersa y analiza, lo que permite identificar y cuantificar los elementos presentes en la madera [34].
3. Espectroscopía de Emisión Fluorescente de Rayos X (XRF): Esta metodología emplea radiación de rayos X para excitar los átomos en la muestra de madera. La luz emitida por fluorescencia de estos átomos es analizada para determinar la composición elemental de la madera [32].
4. Espectroscopía de Emisión Molecular (fluorescencia): Se enfoca en las moléculas presentes en la madera y su capacidad para emitir luz fluorescente bajo excitación. Este método es útil para identificar compuestos específicos y evaluar aspectos como la calidad de la madera o su grado de degradación.

4.6 Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es una forma de energía que se transmite a través del espacio a cierta velocidad. Puede describirse como una onda con propiedades de longitud de onda, frecuencia, velocidad y amplitud. Esta radiación no requiere un medio de transmisión (puede viajar a través del vacío). El modelo de onda no logra explicar los fenómenos asociados con la absorción y emisión de energía radiante, por lo que para estos procesos la radiación electromagnética puede tratarse como paquetes discretos de energía o partículas llamadas fotones o cuantos [35]. Estas visiones duales de la radiación como partículas y ondas no son mutuamente excluyentes, sino complementarias. En la

Figura 4-4 se muestra la naturaleza ondulatoria de un haz de radiación electromagnética de una sola frecuencia.

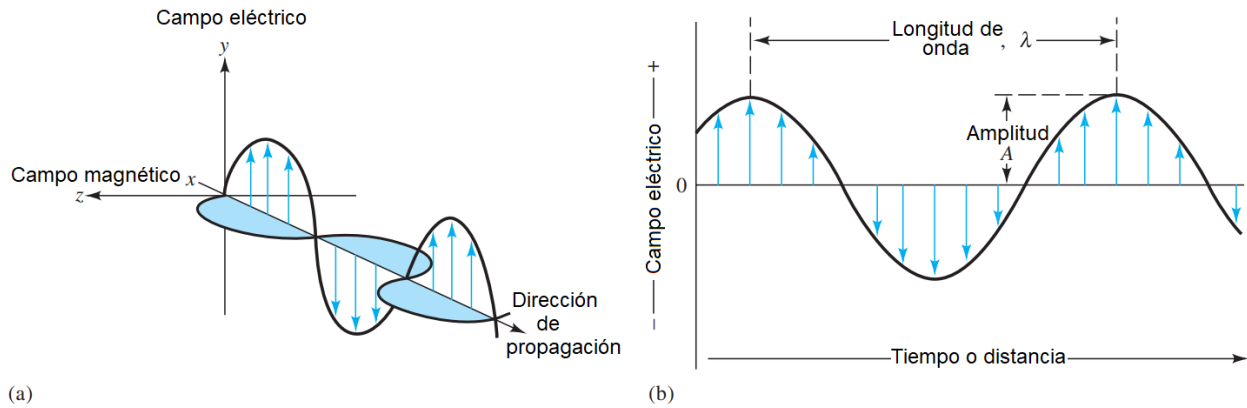


Figura 4-4: (a) Campos electromagnéticos. (b) Componentes del campo eléctrico.

Entonces, podemos decir que la luz es una forma de radiación electromagnética que generalmente corresponde a un conjunto de ondas con diferentes longitudes de onda. La longitud de onda de la luz expresada por el símbolo λ (lambda) se define como la distancia entre dos crestas (o valles) de una onda, medida en la dirección de su progresión.

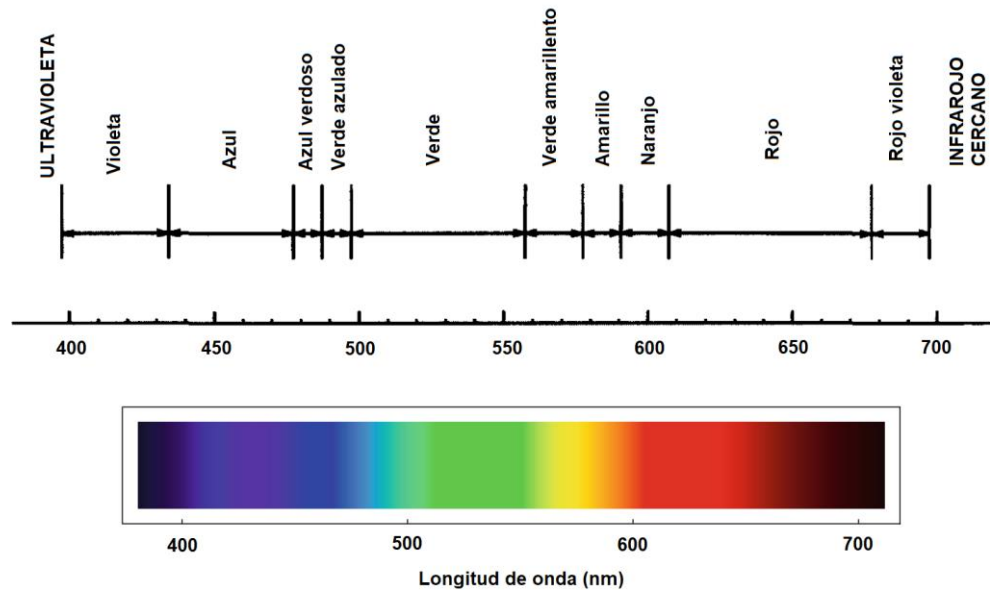


Figura 4-5: Espectro visible. Figura adaptada [45]

El poder radiante P en vatios (W), es la energía de un haz que alcanza un área dada por unidad de tiempo. La intensidad es el poder radiante por unidad de ángulo sólido, y ambas cantidades son proporcionales al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico [35].

Para estudios de laboratorio en general, es conveniente definir la naturaleza de un haz de luz como un flujo de fotones o cuantos, y no como un espectro continuo. La energía de un solo fotón se relaciona con su longitud de onda, frecuencia y número de onda mediante la fórmula $E = h\nu = hc/\lambda = hcn$, donde h es la constante de Planck, ν la frecuencia, c la velocidad de la luz, λ la longitud de onda, y n el número de onda. El poder radiante de un haz de radiación es directamente proporcional al número de fotones por segundo [35].

La radiación electromagnética se divide en varias regiones según los rangos de longitud de onda, como se puede apreciar en la Tabla 4.6-1.

Las técnicas de observación y medición del espectro electromagnético se han desarrollado a partir de formas muy rudimentarias de análisis, las cuales dependían completamente del ojo humano. Por ejemplo, una sustancia coloreada podía ser medida comparando su intensidad de color con una serie de estándares [36].

Región	Rango de Longitudes de Onda
Rayos X	$10^{-12} - 10^{-8} \text{ m}$
Ultravioleta (UV)	$10^{-8} - 3 \times 10^{-7} \text{ m}$
Luz visible	$3 \times 10^{-7} - 8 \times 10^{-7} \text{ m}$
Infrarrojo (IR)	$8 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-4} \text{ m}$
Microondas	$3 \times 10^{-4} - 1 \text{ m}$
Ondas de Radio	$1 - 10^3 \text{ m}$

Tabla 4-1: Regiones del espectro electromagnético [36].

4.6.1 Análisis de la radiación: espectroscopía

En espectroscopía se utilizan las interacciones de la radiación con la materia para obtener información sobre una muestra, y esta generalmente se estimula aplicando energía en forma de calor, energía eléctrica, o una reacción química. La muestra que se está analizando (o analito) se encuentra en su estado de energía más bajo (o estado fundamental), y el estímulo hace que partes del analito pasen a un estado de mayor energía o excitado. Se obtiene información sobre el analito midiendo la radiación electromagnética emitida cuando regresa al estado fundamental [35].

4.6.1.1 Espectro de absorción

Cada especie molecular es capaz de absorber sus propias frecuencias características de radiación electromagnética; este proceso implica una transferencia de energía a la molécula, lo que resulta en una disminución de la intensidad de la radiación incidente. La absorción de la radiación atenúa así el haz de acuerdo con la **ley de absorción** o **ley de Beer**, la cual nos indica cómo la cantidad de atenuación depende de la concentración de las moléculas absorbentes y la longitud del camino sobre el cual ocurre la absorción [35].

4.6.1.2 Espectro de emisión

La radiación emitida por una fuente se caracteriza a menudo mediante un espectro de emisión, que se representa típicamente como un gráfico que muestra la intensidad de la radiación en función de la longitud de onda. En la Figura 4-6 se muestra el espectro de emisión de una muestra de salmuera obtenida con una llama de oxihidrógeno [35].

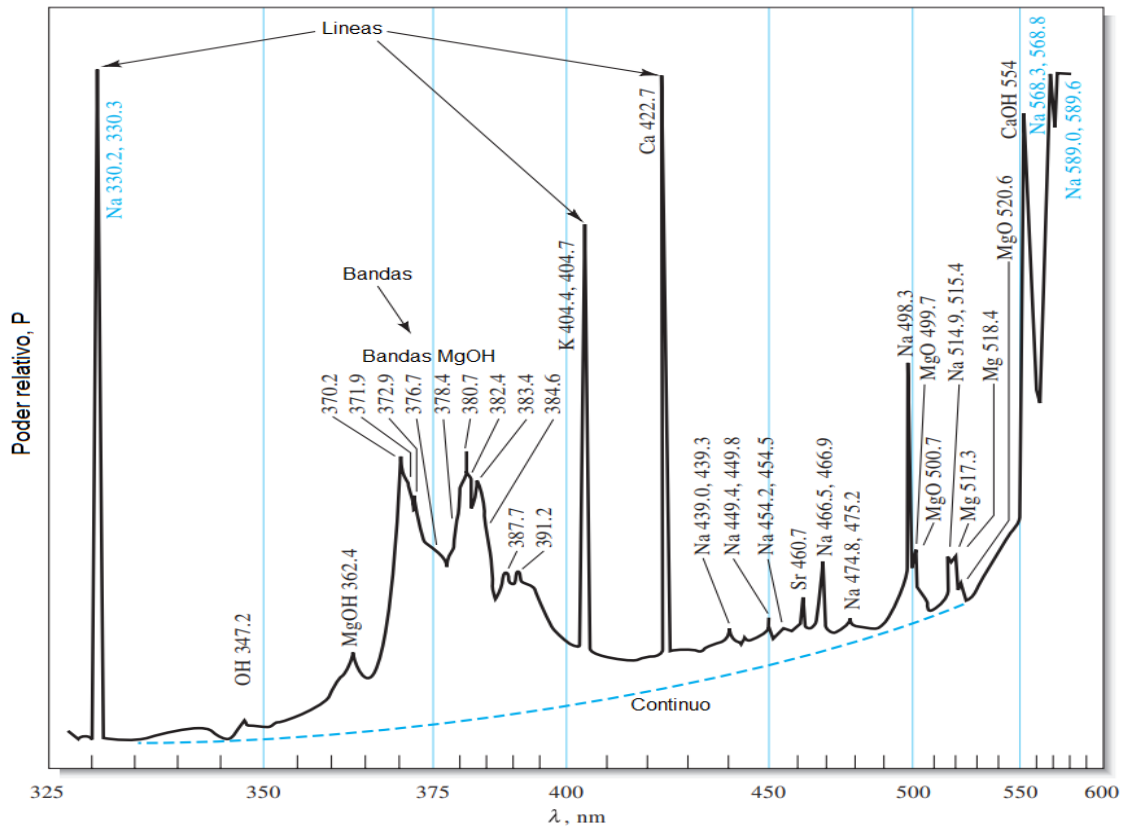


Figura 4-6: Espectro de emisión de muestra de salmuera. Figura adaptada [35].

Se pueden ver tres tipos de espectros: un espectro de líneas, un espectro de bandas y un espectro continuo. Además, se identifican espectros de línea de sodio, potasio, estroncio, calcio y magnesio. El **espectro de líneas** consiste en líneas espectrales distintas, cada una producida por la excitación de átomos individuales. En contraste, el **espectro de bandas** se compone de agrupaciones de líneas que no se distinguen claramente. Por su parte, el **espectro continuo** se representa mediante una línea punteada, indicando una emisión uniforme sin líneas o bandas discretas.

La Figura 4-7 muestra el diagrama de niveles de energía para el sodio [35], donde las líneas horizontales representan los orbitales atómicos. Las líneas de color las transiciones permitidas, las

cuales corresponden a la emisión de fotones en diversas longitudes de onda, y la línea horizontal punteada representa la energía de ionización del sodio.

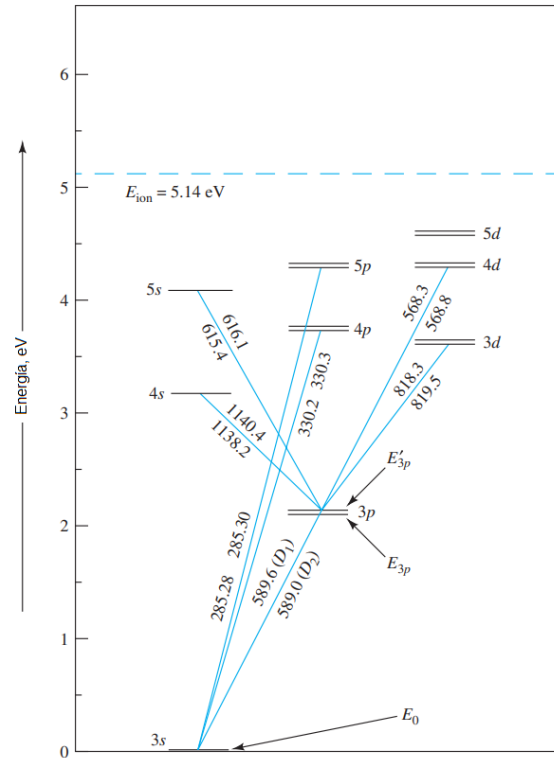


Figura 4-7: Diagrama de energía de iones de sodio. Figura adaptada [35].

El electrón del orbital 3s, que constituye la única capa externa del átomo de sodio en su estado fundamental, puede ser excitado a niveles u orbitales superiores como 3p, 4p o 4d mediante la absorción de energía térmica, eléctrica o radiante [35]. Poco después de su excitación, este electrón retorna al estado fundamental, proceso durante el cual emite un fotón con una longitud de onda específica.

El proceso de emisión desde los dos orbitales del nivel de energía 3 produce dos líneas estrechamente espaciadas en el espectro de emisión llamadas **doblete** [35]. Estas líneas, indicadas por las transiciones etiquetadas como D_1 y D_2 en la Figura 4-7 son las llamadas *líneas "D"* de Fraunhofer.

Un **espectro de banda de emisión** está compuesto por muchas líneas muy cercanas entre sí que son difíciles de resolver individualmente. Los **espectros de banda** se producen a menudo debido a la presencia de radicales gaseosos.

Las bandas en un espectro surgen debido a la superposición de numerosos niveles de vibración cuantizados que existen en estados discretos, dentro del estado electrónico fundamental de un elemento. Esto significa que cada nivel electrónico puede tener asociados varios niveles de energía vibracional específicos y distintos, los cuales, al ser excitados producen un patrón complejo y denso de líneas en el espectro, conocido como “banda”. Como se muestra en la figura 4-8, un espectro continuo de radiación se produce cuando elementos como el carbono y el tungsteno se calientan hasta alcanzar la incandescencia. Este tipo de radiación térmica, conocida como radiación de cuerpo negro, depende más de la temperatura de la superficie emisora que de la naturaleza del material superficial. La radiación de cuerpo negro es característica porque toda la energía emitida es función exclusiva de la temperatura, independientemente de las propiedades materiales del objeto.

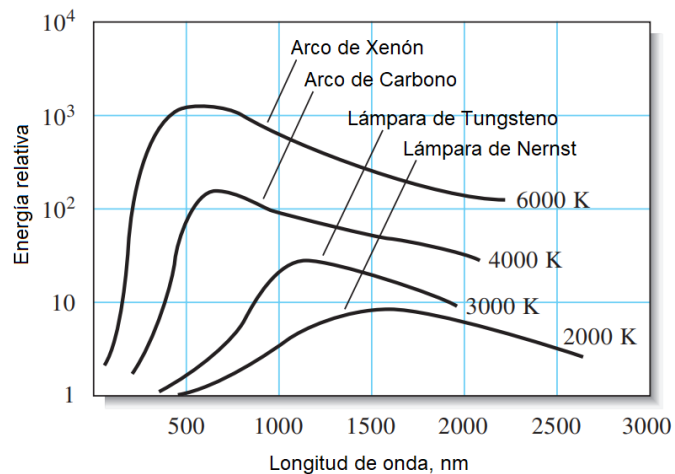


Figura 4-8: Curvas de radiación de cuerpo negro para diversas fuentes de luz.

4.6.2 Radiación de cuerpo negro

Un **cuerpo negro** es un objeto que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él. Es decir, no refleja ni permite que ninguna radiación sea transmitida a través de él [37]. Un modelo clásico para ilustrar la radiación de cuerpo negro implica la construcción de una cavidad con una pequeña abertura y una superficie interna recubierta con un material de color negro mate. Este diseño

asegura que la luz que ingresa por la apertura tenga una probabilidad extremadamente baja de reflejarse hacia afuera. La mayoría de los fotones que entran son retenidos y absorbidos por las paredes internas de la cavidad tras múltiples reflexiones. Esta configuración facilita que la cavidad funcione como un absorbente ideal, capturando toda la radiación que entra sin reflejarla, lo cual es una característica esencial de un cuerpo negro teórico [38]. Este ejemplo se ilustra en la Figura 4-9.

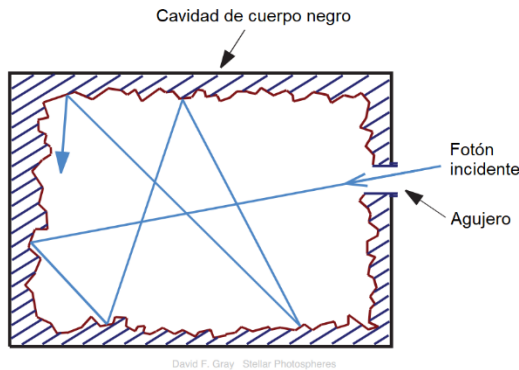


Figura 4-9: Contenedor que simula a un cuerpo negro. Figura adaptada.

A temperaturas inferiores a aproximadamente 700 K (430 °C), los cuerpos negros emiten muy poca radiación en el espectro visible y, por lo tanto, parecen negros a la percepción humana. Sin embargo, emiten radiación infrarroja que puede detectarse. A temperaturas superiores a 700 K, la emisión de radiación visible por parte de los cuerpos negros aumenta, lo que hace que se perciban colores que varían desde el rojo en temperaturas más bajas hasta el azul en temperaturas más altas, indicando una emisión cada vez más intensa en las longitudes de onda cortas del espectro visible. Hay dos leyes que se relacionan con la radiación electromagnética que sigue un espectro de cuerpo negro: Ley de Wien y Ley de Stefan–Boltzmann.

4.6.2.1 Ley de Wien

La **ley de desplazamiento de Wien** describe cómo la longitud de onda en la que el espectro de un cuerpo negro alcanza su máxima intensidad es inversamente proporcional a la temperatura de la superficie del cuerpo. Específicamente, a mayores temperaturas, la longitud de onda correspondiente al pico de emisión es más corta. La longitud de onda pico, λ_{\max} , se calcula utilizando la fórmula $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$, donde b es la constante de Wien, que tiene un valor de 2.897×10^{-3} metros por kelvin y T es la temperatura en kelvin.

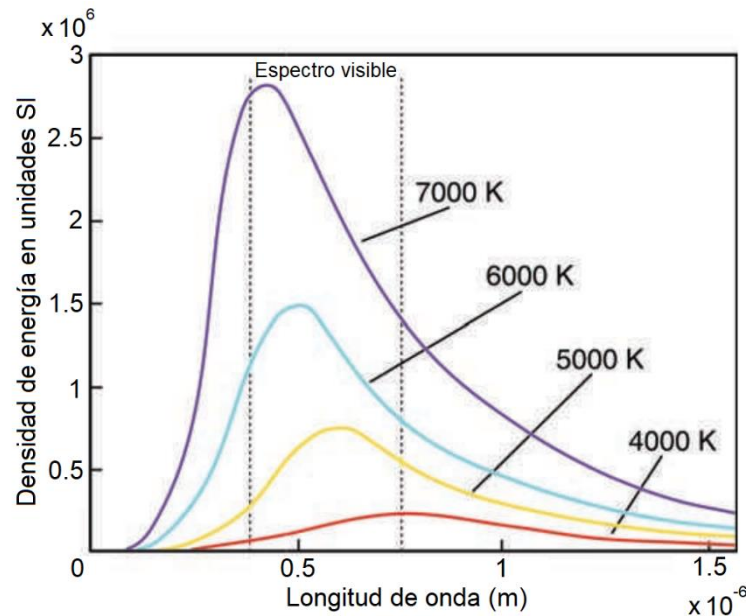


Figura 4-10: Radiación de cuerpo negro a diferentes temperaturas. Figura adaptada.

4.6.2.2 Ley de Stefan-Boltzmann

La Ley de Stefan-Boltzmann, una de las leyes fundamentales en el estudio de la radiación de cuerpo negro, establece que la energía total irradiada por unidad de área de un cuerpo negro en un intervalo de tiempo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta [37]. La constante de proporcionalidad en esta relación es conocida como la constante de Stefan-Boltzmann, simbolizada σ , con un valor de $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Consecuentemente, la potencia total emitida por un cuerpo con un área superficial A y una temperatura T se puede calcular usando la fórmula $E = \sigma A T^4 W$. Esta relación indica que tanto la longitud de onda pico de la emisión como la potencia total irradiada están directamente relacionadas con la temperatura superficial del cuerpo negro [37].

4.6.3 Espectro de la llama

Los primeros espectroscopios de llama fueron desarrollados a finales del siglo XIX para estudiar elementos como el sodio, el potasio y el litio, que emiten luz visible al ser excitados térmicamente [39]. Se reconoce que el espectro proporciona valiosos indicadores sobre la naturaleza y composición de muestras orgánicas e inorgánicas. Esta representación se denomina "firma espectral" y es característica de la sustancia analizada [40]. Para identificar la firma espectral de la madera, se utiliza la espectrometría de emisión óptica, empleando el método de combustión de madera. En el rango del espectro visible, es posible discernir información detallada de los picos del sodio (aproximadamente 589 nm) y del potasio (aproximadamente 767 nm).

La madera puede ser considerada un combustible que se quema mediante una reacción entre el oxígeno y otros gases. El término "llama" se refiere al proceso de combustión, que implica la liberación rápida de energía química en forma de energía térmica y radiante durante la reacción química de oxidación-reducción entre el agente reductor (combustible) y el oxidante [41]. La combustión puede ser completa o incompleta, dependiendo de si el combustible se oxida completamente con suficiente oxidante. En este estudio, nos enfocamos en la combustión incompleta, caracterizada por dejar residuos parcialmente oxidados cuando la madera es quemada.

Un signo evidente de que está ocurriendo el proceso de combustión es la aparición de una llama visible, que puede clasificarse en dos tipos: de difusión y premezclada [41]. Esta investigación se centra en la llama de difusión, caracterizada por la mezcla del combustible y el oxidante durante el proceso de combustión, y no antes, lo que también justifica su denominación como llama no premezclada.

4.6.3.1 *Procesos físicos y químicos en la combustión de muestra de madera*

Durante el calentamiento hasta aproximadamente 100 °C, la madera se seca por evaporación de la humedad, sin experimentar cambios químicos significativos [21]. Posteriormente, entre 160 °C y 200 °C, ocurre la liberación de agua mediante la deshidratación de los polímeros de la pared celular, que constituyen la mayoría de los gases emitidos. En la quema de madera se distinguen dos procesos principales: pirólisis y combustión [21]. La pirólisis es la descomposición térmica de la madera en condiciones de oxígeno limitado o ausente, proceso que tiene lugar entre 225 °C y 500 °C. Esta reacción produce compuestos gaseosos y sólidos; sin embargo, la madera en sí no arde directamente,

sino que son estos gases volátiles e inflamables los que se queman, en un fenómeno conocido como combustión llameante [21]. Los productos de la pirólisis incluyen alquitrán y un residuo sólido conocido como carbón, que permanece en la superficie de la madera quemada. La oxidación del carbón da lugar a la combustión incandescente o de brasa, la cual a su vez libera humo, un producto no volátil [21]. Una imagen ilustrativa de los productos de la combustión es la figura 4-11.

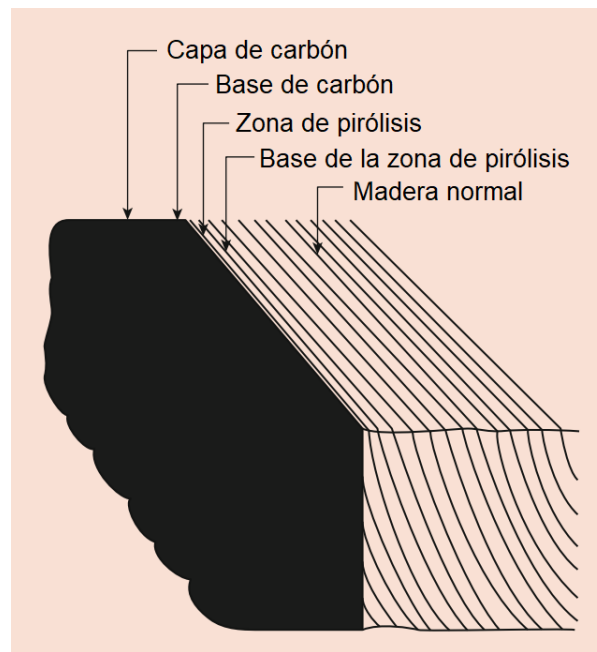


Figura 4-11: Productos de la combustión de un trozo de madera.

5 Configuración experimental

Para realizar este estudio se utilizó el laboratorio SPYR ubicado en la Universidad de Concepción.

5.1 Instrumentos

En relación con la instrumentación se utilizaron los siguientes elementos:

5.1.1 Lámpara de calibración HL-2000

En general, las lámparas de calibración se usan en un espectrómetro para realizar, valga la redundancia, calibración y corrección del instrumento. Esto garantiza mediciones precisas, confiables y estandarizadas en cualquier tiempo de integración. Espectros de onda conocidos emiten líneas con longitudes de onda conocidas, lo que permite establecer una relación entre el espectro proveniente de la lámpara de calibración medido por el espectrómetro, con el espectro que debería medirse de la lámpara de calibración si se estuviera usando un instrumento calibrado. Esta información es la que contiene el vector de calibración que entrega el fabricante. De esta forma, se calibra el espectrómetro y se determina las longitudes de onda exactas para las mediciones de otras fuentes desconocidas. Hay varios tipos de lámparas según la región del espectro en la que trabajen: lámparas de deuterio para el ultravioleta, lámparas de tungsteno para el infrarrojo, etc. En este caso se usa la lámpara halógena HL-2000 [42] que opera entre los 360nm-2400nm. Se muestra en la siguiente figura:



Figura 5-1: Lámpara de calibración HL-2000.

5.1.2 Espectrómetro FLAME o USB-4000

El espectrómetro a utilizar es el FLAME de Ocean Optics, modelo FLAME-T. Al tener una electrónica análoga al espectrómetro USB-4000, el programa Ocean Optics SpectraSuite lo reconoce como este último. Este radiómetro posee un diseño compacto y portátil, ofrece una alta resolución espectral (permite analizar y detectar características espectrales con gran detalle y precisión), posee flexibilidad y modularidad (se puede configurar con diferentes rendijas y fibras ópticas), entre otras características. Posee un rango espectral en longitud de onda de 345.46nm-1029.18nm, que cubre con las necesidades de este proyecto. Posee un arreglo CCD lineal de 3648 pixeles. Tiene una resolución A/D de 16 bit de cuantización, un *standard slit* de 25 μ m y una resolución espectral de 0.21nm-0.22nm [43]. Esta última característica hace que el uso de este espectrómetro arroje resultados con mayor resolución espectral en comparación a los resultados que se han obtenido en el laboratorio SP&R hasta el momento, pudiéndose incluso detectar el doblete de Sodio con sus dos picos de forma separada (no se había logrado hacer con otros espectrómetros). El instrumento se puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 5-2: Espectrómetro FLAME.

5.1.3 Fibra óptica US/VIS 400um

Es una fibra óptica específica fabricada por Ocean Optics. Está diseñada para transmitir luz en el rango ultravioleta (UV) y el visible (VIS). Tiene un diámetro de núcleo de 400 micrómetros (μ m). Se elige un diámetro ancho debido a que se requiere que pase de forma fluida la luz a través de la fibra y una con un menor diámetro, le costaría un poco más fluir a la luz.

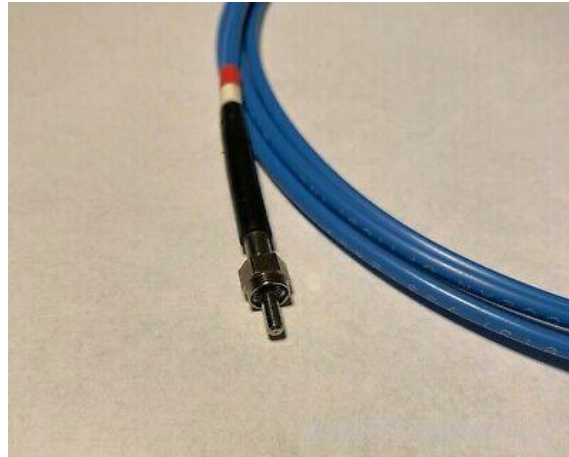


Figura 5-3: Fibra óptica US/VIS 400um.

5.1.4 Lente colimador

Modelo 84-UV-25 de Ocean Insight, diseñado para acoplar ondas del espacio libre en la fibra óptica. Particularmente, este lente colimador de amplio diámetro (25.4 mm), está fabricado para colimar luz a largas distancias de hasta 40 pies. Particularmente, este modelo esta optimizado para el rango UV-Vis entre 185-2500 nm. Posee una estructura robusta al estar hecho de acero inoxidable. Posee una distancia focal de hasta 100mm [44]. Se tiene el lente colimador conectado a la fibra óptica y apuntando a la llama. Su función es convertir la fuente de luz divergente proveniente de la combustión, en un haz de luz paralelo o colimado



Figura 5-4: Lente colimador 84-UV-25 de Ocean Insight.

Con los datos de distancia focal y diámetro del lente colimador, se puede obtener la apertura angular del lente:

$$a = 2 \arctan\left(\frac{25.4\sim\text{mm}/2}{100\sim\text{mm}}\right) = 2 \arctan\left(\frac{12.7\sim\text{mm}}{100\sim\text{mm}}\right)$$

$$a = 2 \arctan(0.127) \approx 2 \times 7.24^\circ = 14.48^\circ$$

Con la apertura angular, se puede calcular el ancho o tamaño del campo visual:

$$W = 2 \times 0.5 \times \tan\left(\frac{14.48^\circ}{2}\right) \approx 12.6\text{cm}$$

Entonces, a una distancia de 50cm se tiene un tamaño de campo visual de $W = 12.6\text{cm}$. Sin embargo, como el lente este hecho para operar de forma óptima a una distancia focal de 10cm de la fuente de luz, al operar el instrumento a 50cm, el resultado del cálculo del tamaño visual obtenido no será uno en el que el lente se esté implementado de buena manera. El lente no se puede operar más cerca de la fuente de luz, ya que, si se acerca más al horno, se calienta excesivamente. En la práctica, el movimiento del lente para enfocararlo en la llama es extremadamente sensible. Esto hace que replicar las mismas condiciones para experimentos en distintos momentos sea complicado, debido a que un pequeño movimiento del lente produce un cambio en la intensidad del espectro observado.

5.1.5 Horno Mufla

El horno disponible en el laboratorio es un tipo específico de horno mufla fabricado por la empresa Quimis, empresa brasileña que produce equipos y aparatos para laboratorios e investigación. Este será el encargado de la combustión de las muestras de madera para su posterior análisis con el espectrómetro. Llega a temperaturas de hasta 1000°C . Se opera a 750°C que es la temperatura que se configura para una combustión limpia y rápida.



Figura 5-5: Horno mufla.

5.2 Muestras de biomasa

Para los experimentos se obtuvieron muestras de madera de 8 árboles distintos. Del total de estos árboles, se usaron finalmente para los resultados de este estudio 6 árboles. Sin embargo, para llegar a la metodología óptima que se utiliza en esta investigación, se tuvo que experimentar con diferentes configuraciones de set-up y modificaciones en las muestras. Por esta razón, se utilizaron los 8 árboles ubicados en 6 lugares distintos para la experimentación y que usa la siguiente nomenclatura:

1. 1Alamo: 1er álamo de Yumbel.
2. 2Alamo: 2do álamo de Yumbel.
3. 3Pino: 1 pino de Yumbel.
4. 4Eucalipto: 1 eucalipto de Hualqui.
5. 5Alamo: 1 álamo de Yungay.
6. 6Roble: 1 roble de Linares
7. 7Olivillo: 1 olivillo de Hualqui.
8. 9Laurel: 1 laurel de Coronel.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, para los resultados solo se utiliza 6 árboles que corresponden a los 6 primeros nombrados. En la siguiente figura, se puede observar todas las muestras de los árboles obtenidas:



Figura 5-6: Muestras de árboles.

Se puede apreciar la toma de muestras a distintas alturas de los árboles, incluyendo además muestras de raíces, cortezas y ramas. Se obtuvieron muestras de tierra del lugar donde estaban plantados los árboles, no obstante, en este estudio no se logró obtener el espectro de la quema de la tierra. Esto debido a que la combustión se produce en la materia orgánica y esta es la que libera el espectro de emisión de Na y K, y en la tierra, estos elementos no se encuentran en compuestos orgánicos. Las cortes transversales de los árboles a distintas alturas tienen un tamaño de 10[cm], son 5 cortes y son equidistantes entre sí a lo largo de todo el árbol.

En primera instancia, la metodología consistió en la quema de muestras de madera sin métodos de estandarización de ningún tipo y con un tiempo de integración de 500[ms]. Posteriormente, para lograr que las muestras de madera tuvieran la misma humedad entre ellas, se intentó con secados de las muestras a distintas temperaturas y tiempos. Así, se llegó finalmente a un secado óptimo de 5 horas a 130°.

En relación con el tamaño de las muestras, se procede a cortarlas con una forma y tamaño estándar de 1[cm]x1[cm]x2[cm], estas dimensiones no están incluidas en las muestras de corteza, ramas ni raíces (se intenta llegar a la forma más parecida posible de la muestra estándar). Se estandarizan además en masa y, dado que las maderas de distintos árboles tienen distinta densidad, se observa la masa que tiene una muestra de determinado árbol con su forma y tamaño estándar. Se estandarizan entonces las

demás muestras de ese árbol con respecto a esa masa. Finalmente, se usa un tiempo de integración de 200[ms] para así obtener más espectros por segundo. En la siguiente figura, se puede ver un ejemplo de muestras de una experimentación:



Figura 5-7: Muestras de madera de álamo listas para experimentar.

En la figura se pueden observar múltiples muestras correspondientes a cada corte de tronco, raíces, ramas y corteza (en ese orden). Se combustiona 4 muestras por sección de árbol. En la imagen se puede ver que hay más de 5 muestras en algunas secciones. Esto se hace en caso de que alguna muestra tenga resultados muy diferentes o que el experimento de combustión haya tenido algún problema. En otras palabras, el objetivo de que haya varias muestras por sección es que los resultados sean más robustos y no se vean interferidos por alguna muestra atípica.

Debido a la gran cantidad de carpetas de archivos de texto obtenidas (130 aproximadamente.), con 275 archivos de texto aproximadamente. cada una, es que se opta por asignar una nomenclatura específica a las carpetas. Cada carpeta corresponde a los archivos de texto obtenidos de la combustión de una muestra de madera. Las 3 secciones de un nombre de carpeta está separada por un “.” (punto). La primera sección indica el árbol del que pertenece la muestra de madera y sigue la enumeración que se indicó con anterioridad al comienzo de este apartado. La segunda sección indica con números del 1 al 5, la sección del tronco a la cual pertenece la muestra (siendo 1 la sección de más abajo del tronco y 5 la de más arriba), “cor” si pertenece a la corteza, “rai” si pertenece a las raíces y “ram” si pertenece

a las ramas. Por último, la última sección de la nomenclatura indica el número de muestra al cual se está refiriendo (generalmente será del 1 al 4). Esto se puede resumir en la siguiente figura:

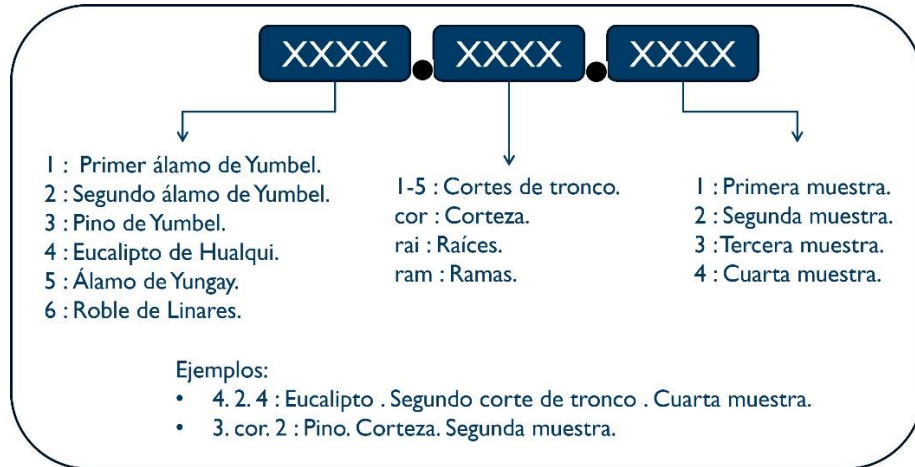


Figura 5-8: Ejemplos de nomenclatura.

5.3 Set-up

Los elementos que configuran el set-up se puede ver en la siguiente figura:

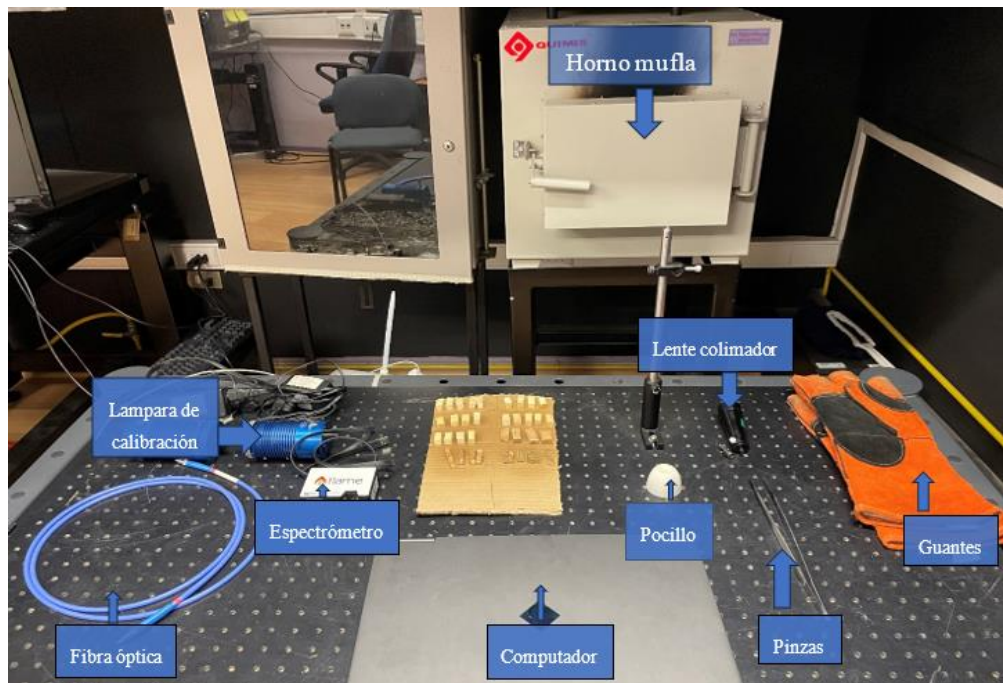


Figura 5-9: Elementos del set-up a utilizar.

El set-up configurado y listo para su uso, se puede ver en la siguiente figura:



Figura 5-10: Set-up experimental.

Este consta de todos los elementos descritos anteriormente. Para llegar a esto se tienen que seguir los siguientes pasos:

1. Despejar la mesa óptica y situarla correctamente al frente del horno.
2. Alejar cualquier elemento que este cerca del horno y se pueda dañar con el calor.
3. Secar las muestras a 130° durante 5 horas.
4. Situar recipiente de cerámica adentro del horno donde se pondrán las muestras.
5. Conectar una lámpara normal a la fibra y esta, directamente al lente colimador que estará puesto en un soporte sobre la mesa óptica. Esto para emitir un haz de luz hasta el horno, para así poder apuntar bien al lugar donde se combustionará la madera (este paso es opcional).
6. Encender el horno y disponer de todas las muestras que se usarán en el experimento.

7. Conectar el computador al espectrómetro y este a la lampara de calibración HL-2000.
8. Iniciar el programa SpectraSuite.
9. Al llegar a aproximadamente 750°C se procede a iniciar una medición en irradiancia absoluta.
10. Configurar el tiempo de integración en 200 [ms].
11. Obtener el espectro de referencia que viene dado por el haz de luz de la lampara de calibración.
12. Obtener el espectro “Dark” del ruido de la electrónica del espectrómetro (para esto, es preferible que se encuentren todas las luces apagadas).
13. Cargar el espectro original de la lampara dado por el fabricante. El archivo se denomina 030410070_FIB.LMP. Con este hecho, se termina con la calibración utilizando el programa SpectraSuite.
14. Se colocan los guantes, se toma la madera con pinzas, se depositan en el recipiente de cerámica y se inicia el guardado de las muestras.
15. Se finaliza el guardado una vez que la muestra se haya apagado su llama.
16. Se vuelve el espectrómetro, cada 8 muestras aproximadamente.
17. Al terminar, se apaga el horno y se cerciora que queda a una temperatura segura.

6 Procesamiento de datos

Los documentos que se obtienen a través de los experimentos se exportan en formato archivo de texto. Se tiene entonces una carpeta con una lista de archivo de texto por cada muestra de madera que se quema. Para el procesamiento de datos se utilizó el software Matlab y se siguieron los siguientes pasos:

1. Cambiar comas por puntos. Los archivos de texto que entrega el programa SpectraSuite contiene números decimales que usan comas y Matlab reconoce los decimales escritos con puntos.
2. Eliminar los archivos de texto que poseen un umbral del segundo doblete de Potasio menor a $2.8849E-01$ Unidades Radiométricas. Al efectuar un experimento, se empiezan a recolectar muestras desde antes de que comience la ignición y termina hasta después de que se apague la llama completamente. Este proceso al ser manual hace que se obtengan carpetas de datos con distinta cantidad de archivos de texto dada la distinta duración de cada experimento y proceso de guardado de datos. El código implementado hace entonces que solo se consideren los archivos donde empiece a crecer el primer pico de Potasio. Se elige el primer pico de Potasio porque se observó que es el que más intensidad tiene y es el primero de los 4 picos que crece (primer y segundo pico de Na, y primer y segundo pico de K). Además, se eligió el valor de umbral anteriormente dicho, después de revisar cada experimento y observar que era un valor lo suficientemente grande para filtrar los archivos de texto que tuvieran un valor de intensidad igual o menor al ruido en el experimento en el lugar del segundo pico de K. Asimismo, no era tan grande como para quitar archivos de texto que contuvieran información del espectro de emisión de las muestras.
3. Calcular la altura relativa de cada uno de los picos a través del tiempo.
4. Integra la curva resultante del grafico de las alturas relativas de los primeros picos de Na y K (por muestra y promediada por sector de árbol)
5. Calcular la proporción de Na/K de estos resultados.
6. Calcular la altura relativa promedio (por muestra y promediada por sector de árbol)
7. Calcular la proporción de Na/K de estos resultados.
8. Calcular el área bajo la curva de cada doblete.
9. Calcular la proporción de Na/K de estos resultados.
10. Calcular interpolación de los vectores resultantes de las alturas relativas de cada muestra.

11. Calcular la correlación entre muestras pertenecientes a un mismo árbol y entre muestras de árboles distintos.
12. Tabular resultados.

7 Resultados y evaluación

7.1 Calibración

Como se indicó en el apartado de **5.3 Set-up**, la calibración se realiza mediante el programa SpectraSuite. En él, se ejecuta la ecuación de calibración del espectrómetro:

$$E_{cal} \left(\frac{\mu W}{nm \cdot cm^2} \right) = \frac{(E_m[cuentas] - D[cuentas]) * V_{cal} \left[\frac{\mu J}{cuentas} \right]}{T_{int}[s] \cdot A[cm^2] \cdot \Delta\lambda[nm]}, \quad (7.1-1)$$

Donde $E_{cal} \left(\frac{\mu W}{nm \cdot cm^2} \right)$ es el espectro calibrado en unidades radiométricas; $E_m[cuentas]$ es el espectro medido en unidad de medida de cuentas (cantidad de electrones que se generan con la interacción de los fotones con el detector); $D[cuentas]$ en cuentas (ruido “dark”) que se obtiene de la electrónica del espectrómetro cuando no pasa luz a través de él, pero si está encendido; $V_{cal} \left[\frac{\mu J}{cuentas} \right]$ es el vector de calibración que es un archivo de texto que proporciona el fabricante que indica la energía en micro Joule [μJ] por cuentas que debería captar un determinado pixel calibrado en determinada longitud de onda; $T_{int}[s]$ es el tiempo de integración en segundos que se usa para captar señales cada cierta tasa de tiempo; $A[cm^2]$ es el área de recolección de luz que viene determinada por el ancho de la fibra óptica (en este caso $400[\mu m]$); y $\Delta\lambda[nm]$ indica la resolución espectral en nanómetros que logra determinado ancho de slit de rendija en el total de pixeles que tiene nuestro arreglo CCD lineal en cuestión.

Por simplicidad, se procede a efectuar la calibración dentro del Software, sin embargo, sería el mismo resultado si se hiciera de forma manual (offline). Para esto, se utilizan los vectores ya mencionados. El **vector de calibración** de la lámpara de calibración es el que entrega el fabricante. Para nuestra lámpara de calibración esto se ilustra en la siguiente figura:

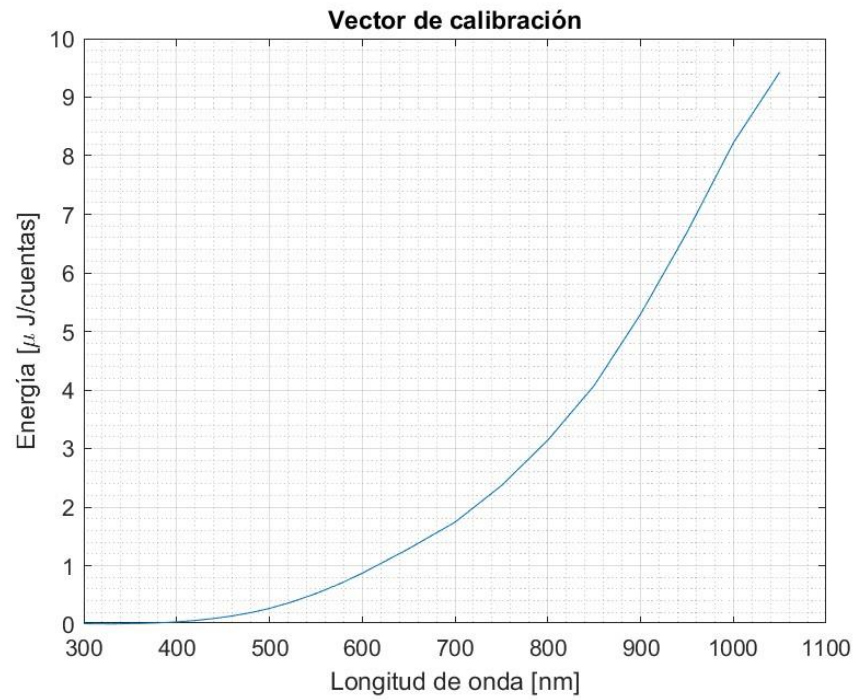


Figura 7-1: Vector de calibración de HL-2000.

El archivo del ruido del "Dark" que se obtuvo es el siguiente:

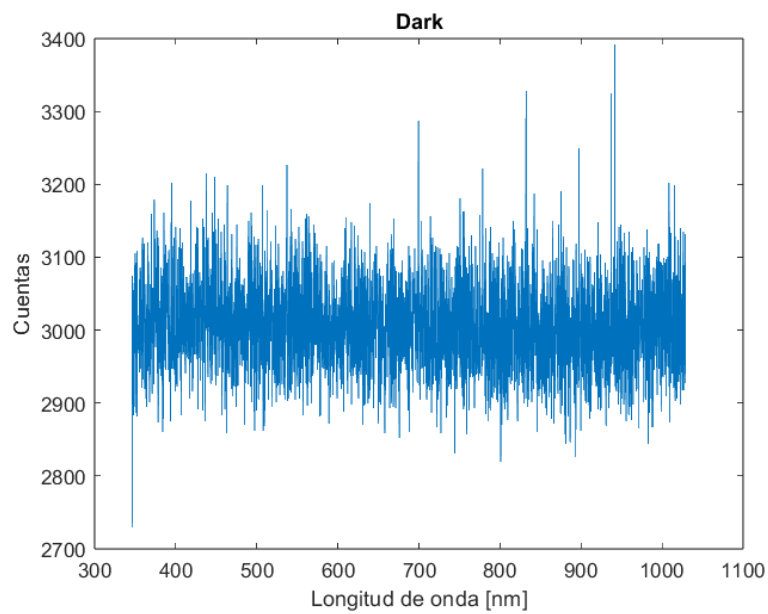


Figura 7-2: Espectro dark.

Finalmente, el archivo de la emisión de la lámpara de calibración que se obtuvo, es el siguiente:

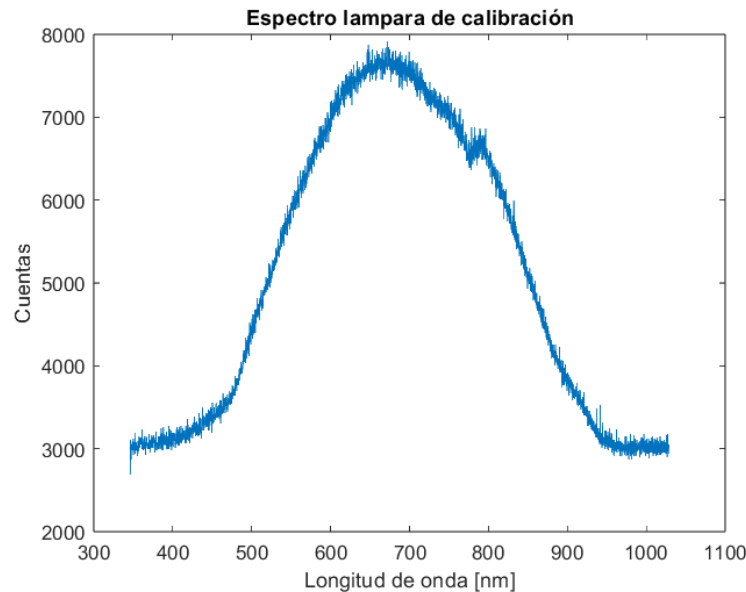


Figura 7-3: Espectro proveniente de lámpara de calibración.

Con todos estos datos, junto con la fórmula **7.1-1**, se puede calibrar fácilmente el espectrómetro. Sin embargo, la ventaja de hacerlo con el software es que se puede apreciar directamente en el momento como se ve el espectro que se está recolectando.

7.2 Espectros calibrados

Se procede a graficar todas las realizaciones de cada experimento (directorio) en un solo gráfico. Para mantener coherencia y cohesión a lo largo del informe, se usa la nomenclatura descrita en la sección **5.2 Preparación de muestras**. Las muestras fueron obtenidas con un tiempo de integración de 200 [ms]; aproximadamente 300 archivos de texto por muestra; y aproximadamente 60 segundos cada experimento. En estos gráficos se pudo evidenciar que independientemente del tipo de árbol o la parte del árbol que se esté quemando, los picos de los dobletes de Sodio y Potasio son aproximadamente: Sodio1=589nm, Sodio2=590nm, Potasio1=766nm, Potasio2= 770nm (pudiendo variar un poco en los decimales). Para simplicidad, se nombra cada pico de los dobletes como se menciona en la siguiente tabla:

Pico 1	Sodio1= 589nm
Pico 2	Sodio2=590nm
Pico 3	Potasio1=766nm
Pico 4	Potasio2=770nm

Tabla 7-1: Nomenclatura de cada pico de cada doblete

Se procede a mostrar un gráfico como ejemplo que representa el espectro de la combustión de una muestra de álamo en determinado instante:

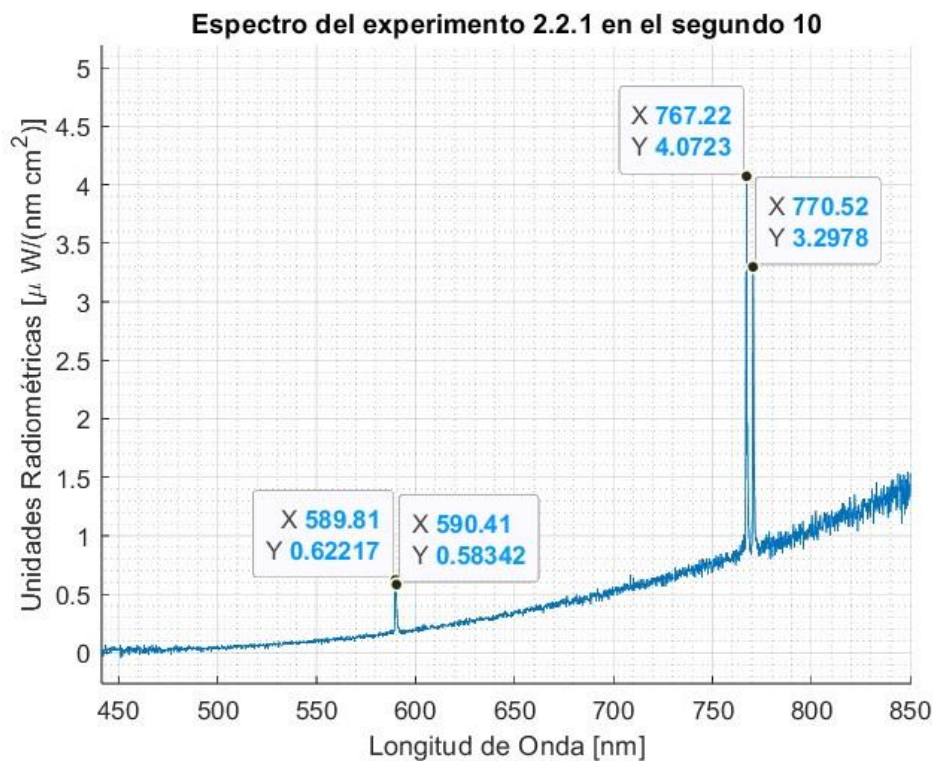


Figura 7-4: Ejemplo de espectro de combustión de una muestra de álamo en el segundo 10

Ahora, para mostrar de forma resumida los resultados de los espectros de todos los instantes de tiempo de un experimento, se muestran los espectros en un solo gráfico. Dada la gran cantidad de experimentos por árbol y que se tiene además varios árboles, se muestran solo algunas figuras como ejemplo:

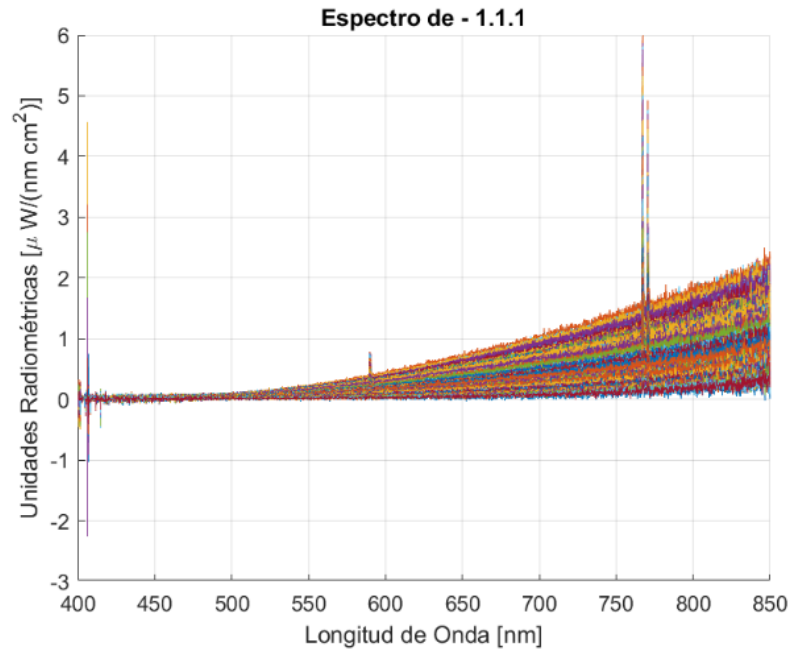


Figura 7-5: Espectros calibrados de 1.1.1. Nomenclatura en Figura 5.2-3

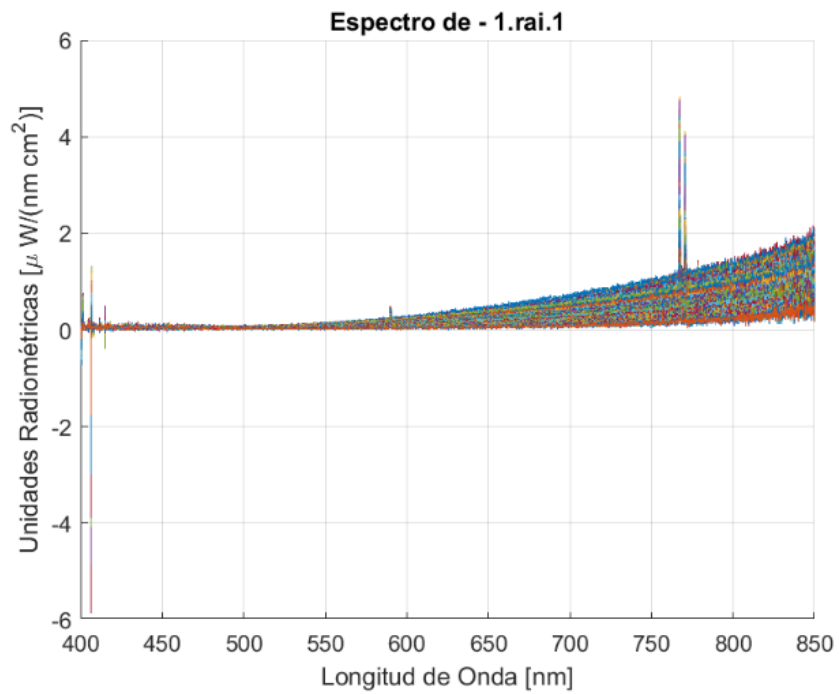


Figura 7-6: espectros calibrados de 1.ra1.1. Nomenclatura en Figura 5-8.

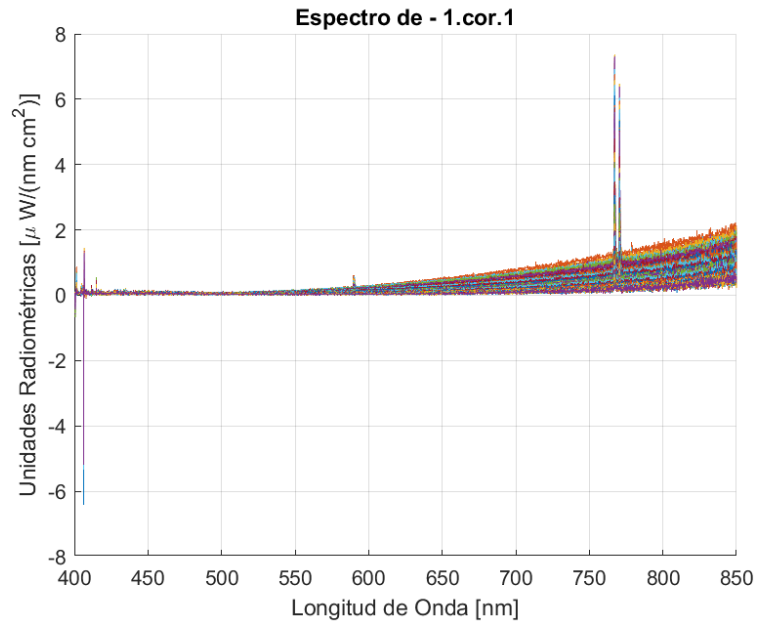


Figura 7-8: Espectros calibrados de 1.ram.1. Nomenclatura en Figura 5-8.

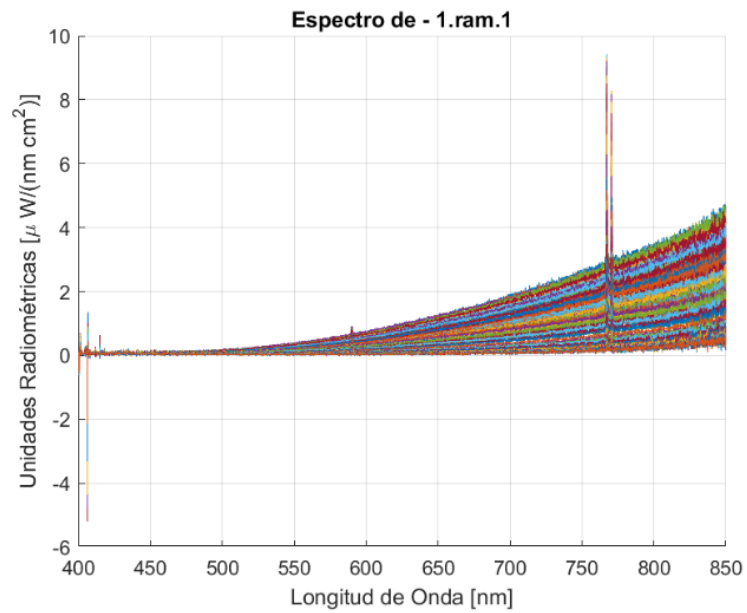


Figura 7-7: Espectros calibrados de 1.cor.1. Nomenclatura en Figura 5.2-3

Los picos de Sodio son los primeros que aparecen (no se alcanza a diferenciar el doblete) y los picos de potasio son los más grandes que aparecen (se alcanza a distinguir el doblete). Haciendo un análisis de inspección visual rápido de las magnitudes de los picos de potasio, nos podemos dar cuenta de que en general, las muestras de corteza y de ramas poseen mayor magnitud en la amplitud de los picos con relación a sus alturas relativas (altura que se mide en relación con la diferencia entre el espectro continuo y la altura máxima del pico).

7.3 Conceptos de utilidad para obtención de resultados

Para el análisis de datos posterior, es necesario explicar algunos conceptos. Para esto se explicará de forma ilustrativa con la siguiente figura:

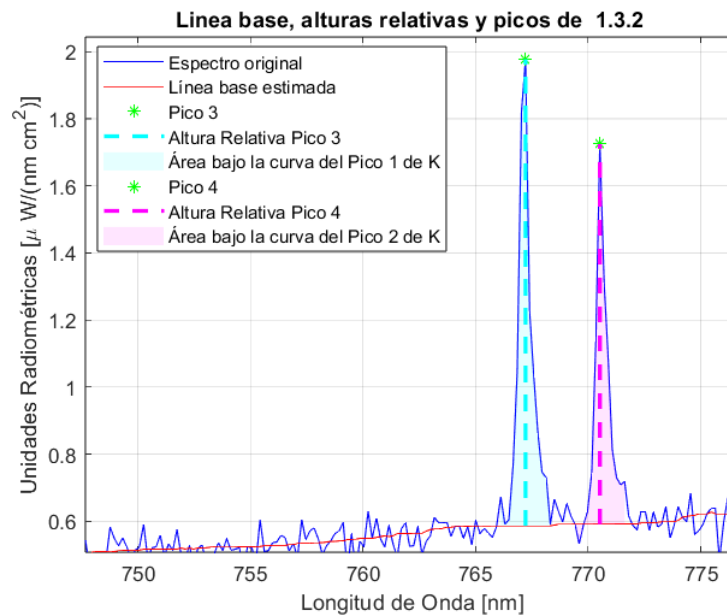


Figura 7-9: Línea base, alturas relativas y picos.

En ella se puede apreciar un acercamiento en el doblete de potasio. La “**línea de base estimada**” es una línea calculada mediante una interpolación lineal a lo largo de todo el espectro, con una ventana que se usará como mascarará para evitar considerar el contenido de los picos. También, se observa que queda pico está bien identificado considerando su punto más alto. Además, se tiene el **área bajo la**

curva del doblete que corresponde a la suma de las áreas bajo la curva delimitada por la línea base (espectro continuo). Por último, tenemos las **alturas relativas** de cada pico que corresponde a la distancia entre el punto más alto del pico y la línea base estimada.

7.4 Análisis de datos

El objetivo de experimentar con 4 muestras por sección de árbol (cortes de tronco, corteza, raíz, rama) es para que los resultados de las métricas aplicadas sean más robustos, confiables y sean menos propensos a errores por la influencia de datos atípicos. Esto puede ser debido a que las muestras no son idénticas entre sí, un pequeño movimiento del lente colimador o simplemente un error en alguna medición. Para evitar esto, es que se reducen las diferencias que puedan tener los resultados de las muestras, estandarizando su tamaño 1[cm]x1[cm]x2[cm] y estandarizando su masa. Debido a que cada madera tiene distinta densidad, se estandarizan las muestras en masa de cada especie de árbol, según lo que pese una muestra con las dimensiones anteriormente dichas. Estandarizar las muestras también hace que tengan un tiempo de combustión similar, lo que es ventajoso para poder usar métricas que comparen punto a punto a través del tiempo como se comportan un conjunto de muestras entre ellas. En la siguiente figura se muestran los resultados de las alturas relativas de 4 muestras pertenecientes a una misma sección de árbol:

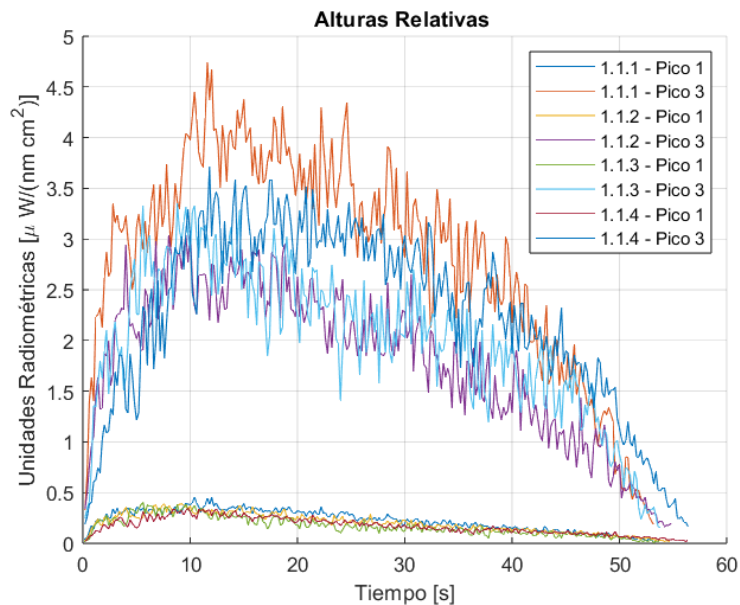


Figura 7-10: Alturas relativas de cada muestra de la primera sección de tronco del primer álamo. Nomenclatura en Figura 5-8.

A continuación, se presenta una figura que muestra los resultados del mismo corte que la figura anterior. Sin embargo, estas muestras no fueron estandarizadas en tamaño y masa, además de que fueron procesadas con un tiempo de integración mayor (500ms). Esto hace que las muestras tengan un tiempo de duración en su combustión notablemente diferente entre sí, tengan menos datos por muestra y tengan un comportamiento notablemente más errático que los experimentos con muestras estandarizadas (los espectros no tienen tanta similitud en cuanto a forma entre sí).

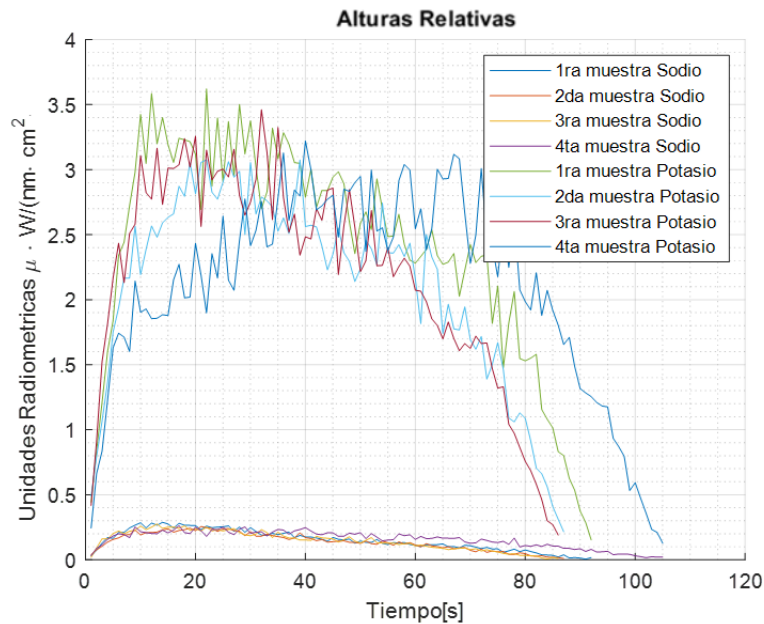


Figura 7-11: Ejemplo de experimentación con muestras no estandarizadas. Nomenclatura en Figura 5-8.

Como se mencionó en la sección **6 Procesamiento de datos** se escoge como referencia la aparición y desaparición del primer pico de K para la discriminación de si un archivo de texto pertenece o no a los datos experimentales de interés. Además, se escogen los primeros picos de Na y K para el cálculo de la altura relativa de sus picos y, por ende, proporción Na/K. Esto debido a que el primer pico de K tiene el mismo comportamiento que el segundo, pero tiene más intensidad. En cuanto al primer pico de Na se elige porque tiene el mismo comportamiento y casi la misma intensidad que el segundo pico de su doblete. Lo anteriormente dicho se puede evidenciar en la siguiente figura donde podemos ver la altura relativa de los picos de cada doblete en un ejemplo de experimento:

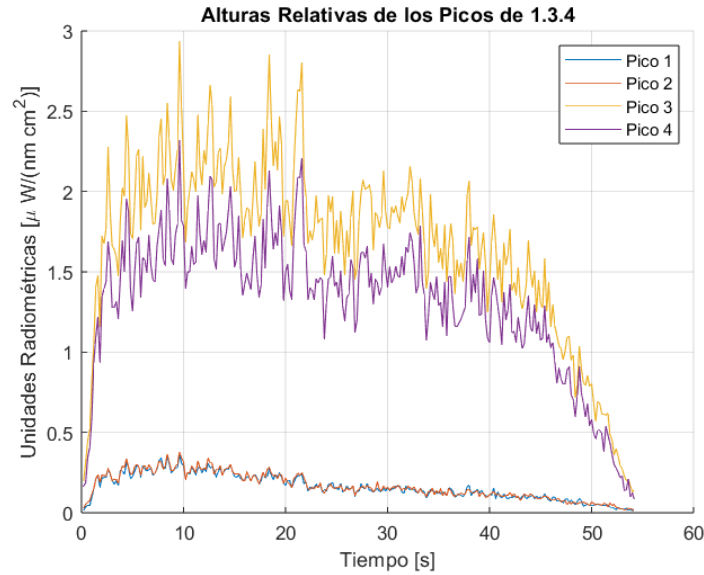


Figura 7-12: Alturas relativas de 1.3.4. Nomenclatura en Figura 5-8.

Para una mejor visualización de los comportamientos de los dobletes, en las siguientes figuras se presentan los dobletes graficados de forma separada correspondientes al mismo experimento. Primero los dobletes de Na:

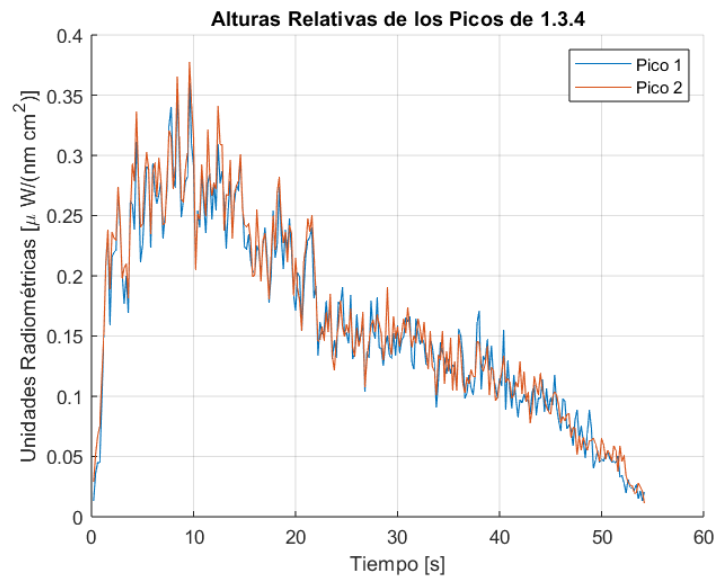


Figura 7-13: Alturas relativas del doblete de Na. Nomenclatura en Figura 5-8 5-8.

Luego, tenemos los dobletes de K:

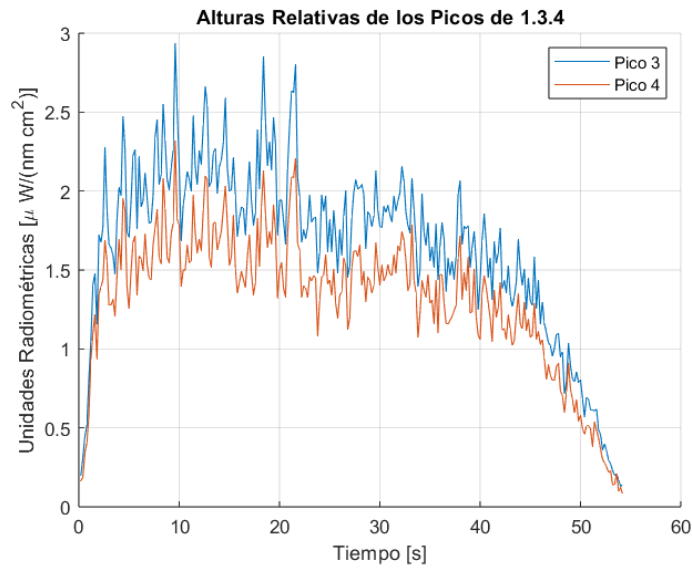


Figura 7-14: Alturas relativas del doblete de K. Nomenclatura en la Figura 5-8

7.4.1 Picos de Sodio y Potasio a través del tiempo

Como se pudo ver en la Figura 7-10, los espectros de las muestras de madera a través del tiempo describen un comportamiento similar entre ellas en cuanto a su “dinámica” de quemado a través del tiempo. En otras palabras, la forma de sus espectros es similar. Se mostrarán como ejemplo diversas figuras donde se podrá apreciar este comportamiento en diversos sectores de un álamo.

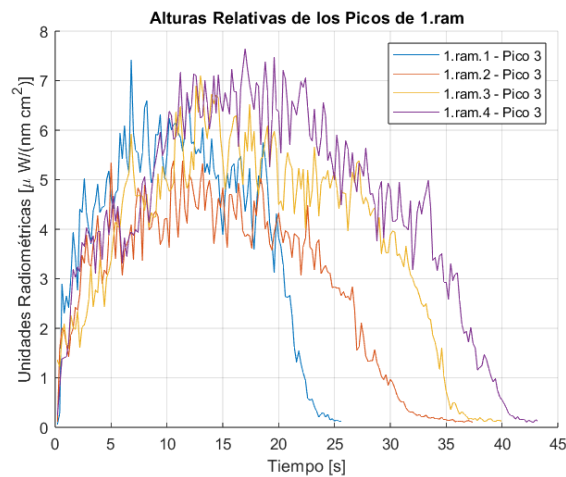


Figura 7-15: Alturas relativas de K de 1.ram. Nomenclatura en Figura 5-8.

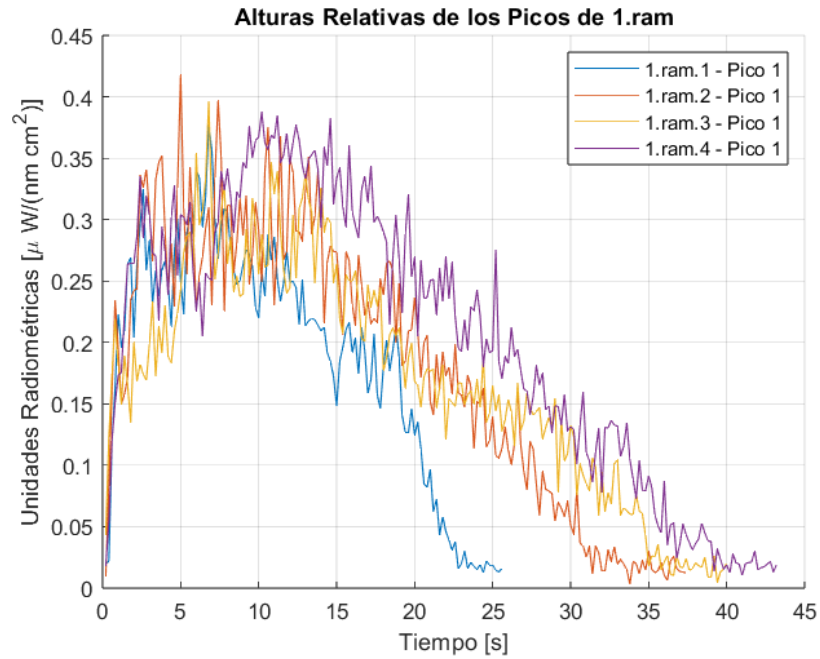


Figura 7-16: Alturas relativas de Na de 1.ram. Nomenclatura en Figura 5-8.

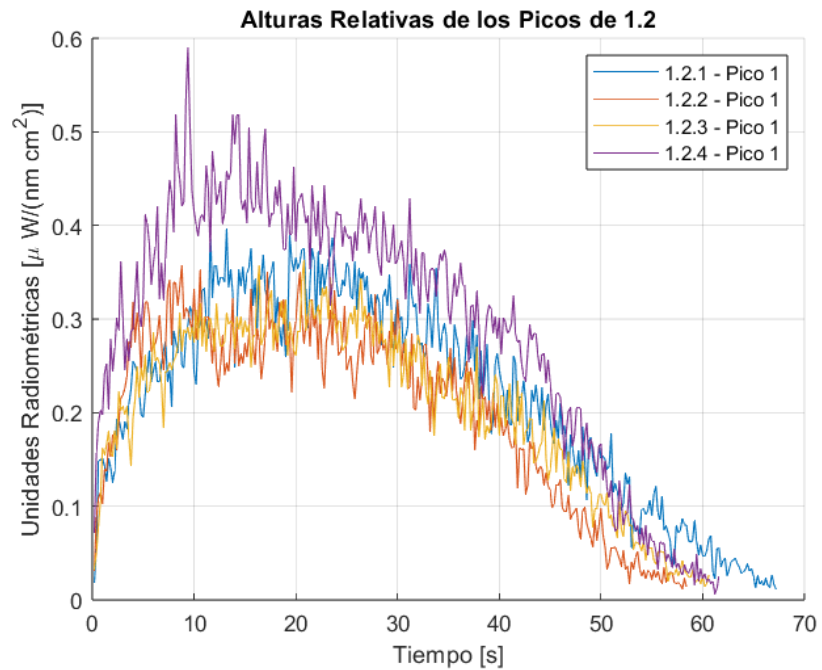


Figura 7-17: Alturas relativas de Na de 1.2. Nomenclatura en Figura 5-8.

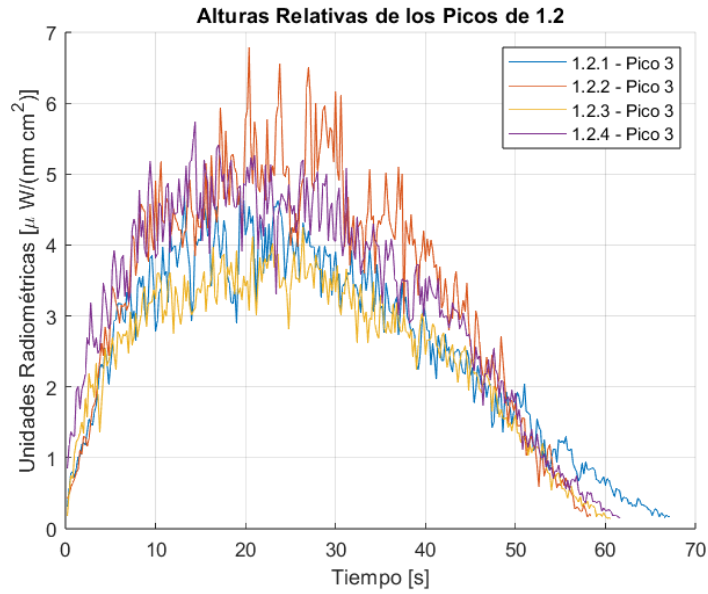


Figura 7-18: Alturas relativas de K de 1.2. Nomenclatura en Figura 5-8.

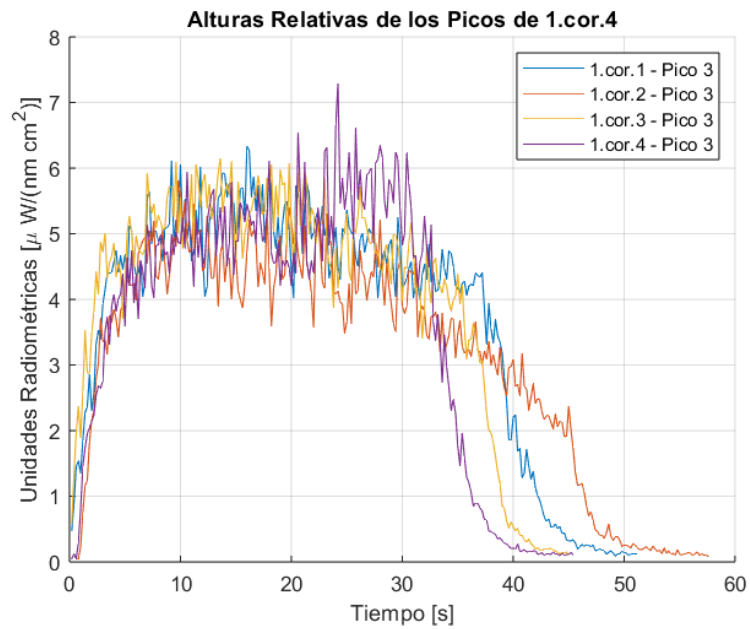


Figura 7-19: Alturas relativas de K de 1.cor. Nomenclatura en Figura 5-8.

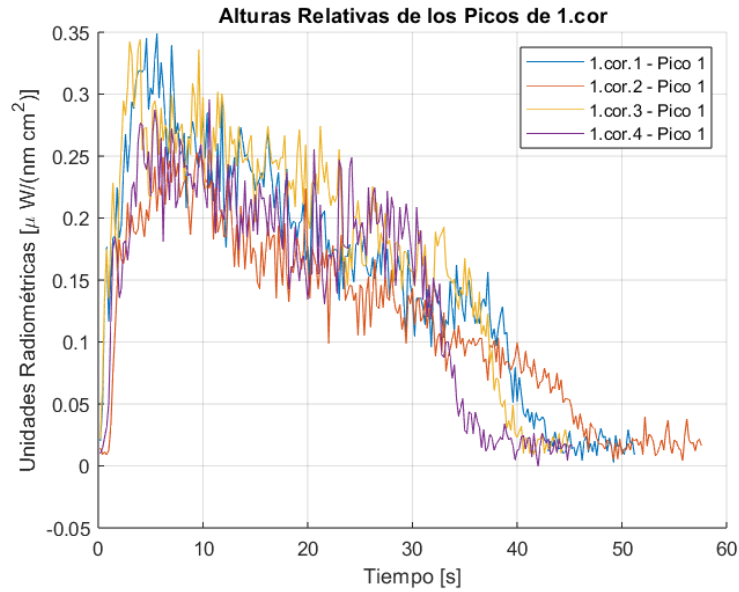


Figura 7-20: Alturas relativas de Na de 1.cor. Nomenclatura en Figura 5-8.

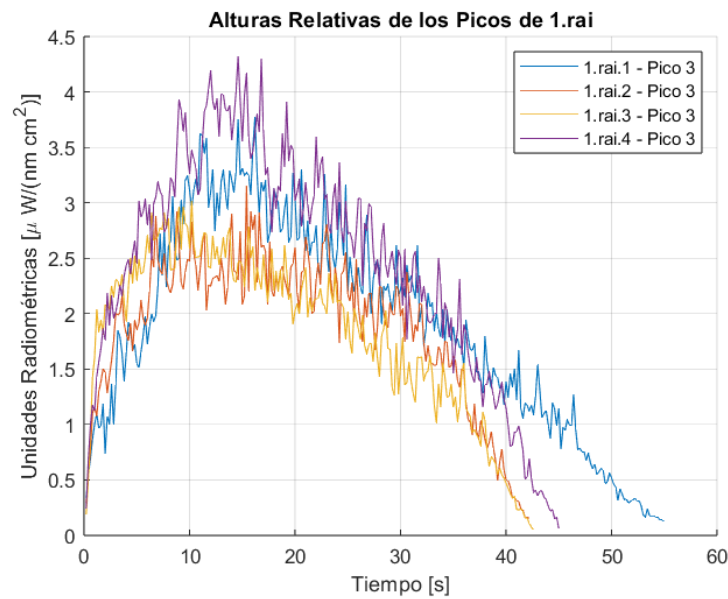


Figura 7-21: Alturas relativas de K de 1.rai. Nomenclatura en Figura 5-8.

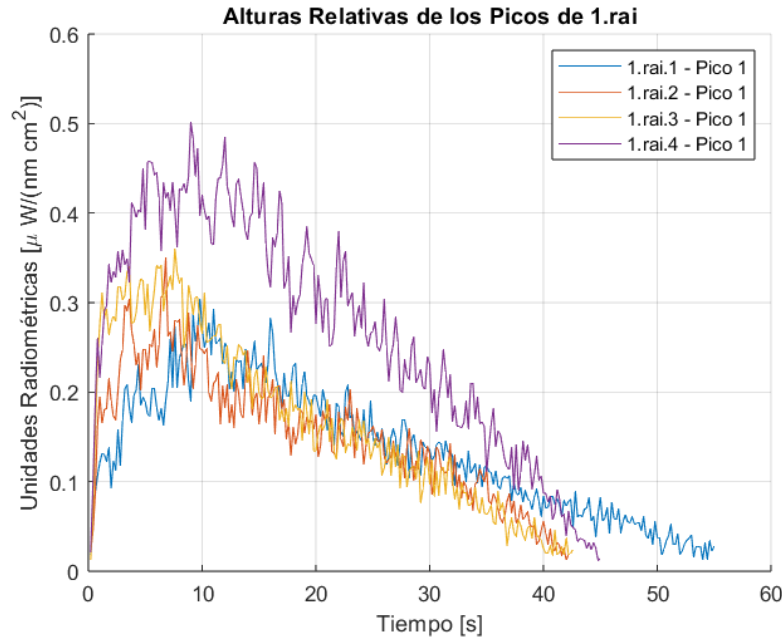


Figura 7-22: Alturas relativas de Na de 1.rai. Nomenclatura en Figura 5-8.

7.4.2 Métricas de análisis de datos

Para analizar el comportamiento del Na y del K a lo largo del árbol, se realizan algunos cálculos para observar si existe algún patrón que se repite en el comportamiento de estos elementos a lo largo de árboles diferentes. Para esto, el primer cálculo que se realiza es **el área bajo la curva** de los gráficos de las alturas relativas a través del tiempo. El segundo cálculo es la **altura promedio** de las alturas relativas a lo largo de una realización experimental. Por último, tenemos el cálculo de las **áreas bajo las curvas de cada doblete** de los elementos que comprende entre el espectro discontinuo y el espectro continuo.

Para cada métrica se calculan primero los resultados por cada muestra extraída de cada sector del árbol. Luego, se tiene la proporción Na/k que hay entre estos resultados. Después, los resultados de cada métrica de cada muestra se agrupan por sector del árbol; recordar que el objetivo de experimentar con varias muestras por sector era solamente para que los resultados fueran más confiables. Finalmente, después de agrupar los resultados por sector del árbol se calcula la proporción Na/K de los datos ya agrupados.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos para el primer álamo, el 1Álamo:

Muestras	Area aturas relativas Na	Area aturas relativas K	Na/K	Promedio de Na	Promedio de K	Na/K
1.1.1	13,93	114,38	0,12	11,73	90,69	0,13
1.1.2	12,15	73,28	0,17	11,73	90,69	0,13
1.1.3	10,23	80,72	0,13	11,73	90,69	0,13
1.1.4	10,61	94,38	0,11	11,73	90,69	0,13
1.2.1	15,76	132,92	0,12	15,23	142,65	0,11
1.2.2	12,71	163,44	0,08	15,23	142,65	0,11
1.2.3	13,36	117,95	0,11	15,23	142,65	0,11
1.2.4	19,10	156,29	0,12	15,23	142,65	0,11
1.3.1	13,09	97,13	0,13	12,62	87,11	0,14
1.3.2	15,70	92,58	0,17	12,62	87,11	0,14
1.3.3	12,73	87,41	0,15	12,62	87,11	0,14
1.3.4	8,97	71,32	0,13	12,62	87,11	0,14
1.4.1	9,55	93,12	0,10	12,18	104,63	0,12
1.4.2	11,05	102,20	0,11	12,18	104,63	0,12
1.4.3	14,00	116,25	0,12	12,18	104,63	0,12
1.4.4	14,10	106,94	0,13	12,18	104,63	0,12
1.5.1	14,37	85,72	0,17	11,57	82,93	0,14
1.5.2	9,92	75,46	0,13	11,57	82,93	0,14
1.5.3	10,90	98,23	0,11	11,57	82,93	0,14
1.5.4	11,10	72,30	0,15	11,57	82,93	0,14
1.cor.1	7,42	161,53	0,05	6,88	152,61	0,05
1.cor.2	6,17	150,79	0,04	6,88	152,61	0,05
1.cor.3	7,69	156,31	0,05	6,88	152,61	0,05
1.cor.4	6,23	141,80	0,04	6,88	152,61	0,05
1.rai.1	7,24	82,56	0,09	8,03	75,24	0,11
1.rai.2	6,26	65,25	0,10	8,03	75,24	0,11
1.rai.3	7,02	63,33	0,11	8,03	75,24	0,11
1.rai.4	11,57	89,82	0,13	8,03	75,24	0,11
1.ram.1	4,60	87,31	0,05	6,47	117,35	0,06
1.ram.2	6,51	91,10	0,07	6,47	117,35	0,06
1.ram.3	6,51	129,16	0,05	6,47	117,35	0,06
1.ram.4	8,26	161,84	0,05	6,47	117,35	0,06

Tabla 7-2: Tabla de resultados de área bajo la curva de alturas relativas del primer álamo de Yumbel. Nomenclatura en Figura 5-8.

Muestras	Altura promedio Na	Altura promedio K	Na/K	Promedio de Na	Promedio de K	Na/K
1.1.1	0,23	2,82	0,08	0,19	2,21	0,09
1.1.2	0,20	1,79	0,11	0,19	2,21	0,09
1.1.3	0,17	2,00	0,08	0,19	2,21	0,09
1.1.4	0,17	2,23	0,08	0,19	2,21	0,09
1.2.1	0,22	2,52	0,09	0,23	2,92	0,08
1.2.2	0,20	3,48	0,06	0,23	2,92	0,08
1.2.3	0,21	2,49	0,08	0,23	2,92	0,08
1.2.4	0,29	3,19	0,09	0,23	2,92	0,08
1.3.1	0,22	2,10	0,10	0,22	1,94	0,11
1.3.2	0,27	2,07	0,13	0,22	1,94	0,11
1.3.3	0,21	1,92	0,11	0,22	1,94	0,11
1.3.4	0,16	1,66	0,10	0,22	1,94	0,11
1.4.1	0,17	2,22	0,08	0,23	2,48	0,09
1.4.2	0,22	2,57	0,09	0,23	2,48	0,09
1.4.3	0,26	2,71	0,10	0,23	2,48	0,09
1.4.4	0,25	2,40	0,11	0,23	2,48	0,09
1.5.1	0,25	1,83	0,13	0,21	1,83	0,11
1.5.2	0,18	1,71	0,10	0,21	1,83	0,11
1.5.3	0,20	2,16	0,09	0,21	1,83	0,11
1.5.4	0,20	1,61	0,13	0,21	1,83	0,11
1.cor.1	0,16	3,68	0,04	0,15	3,61	0,04
1.cor.2	0,12	3,06	0,04	0,15	3,61	0,04
1.cor.3	0,18	4,05	0,05	0,15	3,61	0,04
1.cor.4	0,15	3,64	0,04	0,15	3,61	0,04
1.rai.1	0,14	1,88	0,07	0,18	2,02	0,09
1.rai.2	0,15	1,89	0,08	0,18	2,02	0,09
1.rai.3	0,17	1,84	0,09	0,18	2,02	0,09
1.rai.4	0,27	2,44	0,11	0,18	2,02	0,09
1.ram.1	0,19	4,05	0,05	0,19	3,78	0,05
1.ram.2	0,18	2,87	0,06	0,19	3,78	0,05
1.ram.3	0,17	3,83	0,04	0,19	3,78	0,05
1.ram.4	0,20	4,38	0,05	0,19	3,78	0,05

Tabla 7-3: Tabla de resultados de alturas promedio de las alturas relativas del primer álamo de Yumbel.

Nomenclatura en Figura 5-8.

Muestras	Area doblete Na	Area doblete K	Na/K	Promedio de Na	Promedio de K	Na/K
1.1.1	72,70	854,54	0,09	61,22	683,35	0,09
1.1.2	63,79	556,10	0,11	61,22	683,35	0,09
1.1.3	53,30	608,03	0,09	61,22	683,35	0,09
1.1.4	55,08	714,72	0,08	61,22	683,35	0,09
1.2.1	84,75	978,81	0,09	82,08	1061,58	0,08
1.2.2	67,69	1240,60	0,05	82,08	1061,58	0,08
1.2.3	71,53	870,74	0,08	82,08	1061,58	0,08
1.2.4	104,36	1156,17	0,09	82,08	1061,58	0,08
1.3.1	71,81	730,77	0,10	69,23	658,26	0,11
1.3.2	87,09	701,58	0,12	69,23	658,26	0,11
1.3.3	69,80	664,65	0,11	69,23	658,26	0,11
1.3.4	48,23	536,03	0,09	69,23	658,26	0,11
1.4.1	51,16	695,37	0,07	66,96	796,33	0,08
1.4.2	60,66	788,87	0,08	66,96	796,33	0,08
1.4.3	77,55	892,83	0,09	66,96	796,33	0,08
1.4.4	78,47	808,24	0,10	66,96	796,33	0,08
1.5.1	79,30	636,88	0,12	63,76	618,08	0,10
1.5.2	54,07	568,36	0,10	63,76	618,08	0,10
1.5.3	59,91	726,66	0,08	63,76	618,08	0,10
1.5.4	61,75	540,40	0,11	63,76	618,08	0,10
1.cor.1	41,26	1216,86	0,03	38,21	1147,91	0,03
1.cor.2	34,11	1130,23	0,03	38,21	1147,91	0,03
1.cor.3	42,94	1173,50	0,04	38,21	1147,91	0,03
1.cor.4	34,53	1071,02	0,03	38,21	1147,91	0,03
1.rai.1	39,43	630,17	0,06	44,38	560,93	0,08
1.rai.2	34,55	483,90	0,07	44,38	560,93	0,08
1.rai.3	38,56	473,65	0,08	44,38	560,93	0,08
1.rai.4	64,97	655,98	0,10	44,38	560,93	0,08
1.ram.1	25,60	651,36	0,04	36,17	875,36	0,04
1.ram.2	36,73	683,48	0,05	36,17	875,36	0,04
1.ram.3	36,09	963,78	0,04	36,17	875,36	0,04
1.ram.4	46,24	1202,83	0,04	36,17	875,36	0,04

Tabla 7-4: Tabla de resultados de áreas de cada doblete del primer álamo de Yumbel. Nomenclatura Figura 5-8.

Con estas tablas se puede observar que con las 3 métricas se obtiene un resultado análogo. Por lo que basta un análisis de las áreas de los gráficos de las alturas relativas para obtener conclusiones de cómo se comporta el Na y K a través de un árbol. Dicho esto, se muestran los resultados obtenidos del segundo árbol, 2Álamo:

Muestras	Area alturas relativas Na	Area alturas relativas K	Na/K	Promedio de Na	Promedio de K	Na/K
2.1.1	15,29	66,69	0,23	14,27	72,48	0,20
2.1.2	19,97	104,80	0,19	14,27	72,48	0,20
2.1.3	14,44	72,76	0,20	14,27	72,48	0,20
2.1.4	7,39	45,65	0,16	14,27	72,48	0,20
2.2.1	13,46	95,20	0,14	14,61	103,74	0,14
2.2.2	16,85	90,65	0,19	14,61	103,74	0,14
2.2.3	14,39	84,28	0,17	14,61	103,74	0,14
2.2.4	13,72	144,81	0,09	14,61	103,74	0,14
2.3.1	12,05	83,55	0,14	12,65	90,52	0,14
2.3.2	11,03	93,58	0,12	12,65	90,52	0,14
2.3.3	14,74	103,91	0,14	12,65	90,52	0,14
2.3.4	12,77	81,03	0,16	12,65	90,52	0,14
2.4.1	13,48	129,96	0,10	11,32	105,87	0,11
2.4.2	13,01	108,96	0,12	11,32	105,87	0,11
2.4.3	8,85	97,00	0,09	11,32	105,87	0,11
2.4.4	9,94	87,55	0,11	11,32	105,87	0,11
2.5.1	8,95	105,85	0,08	7,73	88,83	0,09
2.5.2	7,62	79,01	0,10	7,73	88,83	0,09
2.5.3	5,93	79,07	0,08	7,73	88,83	0,09
2.5.4	8,43	91,40	0,09	7,73	88,83	0,09
2.cor.1	3,96	86,91	0,05	4,54	90,86	0,05
2.cor.2	4,68	78,62	0,06	4,54	90,86	0,05
2.cor.3	5,00	90,67	0,06	4,54	90,86	0,05
2.cor.4	4,50	107,24	0,04	4,54	90,86	0,05
2.rai.1	6,50	83,61	0,08	5,59	86,76	0,06
2.rai.2	5,58	79,64	0,07	5,59	86,76	0,06
2.rai.3	5,77	99,07	0,06	5,59	86,76	0,06
2.rai.4	4,49	84,71	0,05	5,59	86,76	0,06
2.ram.1	14,96	52,18	0,29	6,51	89,85	0,07
2.ram.2	7,90	96,87	0,08	6,51	89,85	0,07
2.ram.3	7,15	91,01	0,08	6,51	89,85	0,07
2.ram.4	4,47	81,67	0,05	6,51	89,85	0,07

Tabla 7-5: Tabla de resultados de área bajo la curva de alturas relativas para el segundo álamo de Yumbel.

Nomenclatura en Figura 5-8.

2.ram.1	14,96	52,18	0,29
2.ram.2	7,90	96,81	0,08
2.ram.3	7,15	91,01	0,08
2.ram.4	4,47	81,67	0,05

Tabla 7-6: Resultados de muestras de ramas del segundo álamo de Yumbel.

2.rai.1	6,50	83,61	0,08
2.rai.2	5,58	79,64	0,07
2.rai.3	5,77	99,07	0,06
2.rai.4	4,49	84,71	0,05
2.rai.5	1,72	13,33	0,13

Tabla 7-7: Resultados de muestras de raíces del segundo álamo de Yumbel.

Como era de esperarse, algunas muestras poseen resultados atípicos. Esto hace que, al calcular el promedio por sector del árbol, para agrupar los resultados de Na y K, se puedan obtener resultados que alteren un posible patrón de comportamiento a lo largo de la estructura del árbol (tanto de Na, como de K y su proporción respectiva). Sin embargo, esto no puede ser asumido con seguridad de que sea una muestra atípica o algún error de medición, ya que, solamente 4 muestras no es una cantidad lo suficientemente grande como para asumir que una muestra atípica, no sea realmente una muestra que obedezca a la regla y las demás 3 sean atípicas. Dado entonces que no podemos tener la certeza de la verdadera naturaleza de los comportamientos de estos elementos a lo largo del árbol con esta cantidad de experimentos, es que se dejan todos los resultados y no se elimina ninguno.

Es interesante lo que ocurre en la **Tabla 7-7**. Como se puede observar, la muestra **2.rai.5** posee un comportamiento notoriamente distinto a las demás muestras. Esto se debe a que, a pesar de que las 5 muestras que se exhiben son obtenidas de las raíces, la muestra 2.rai.5 era notoriamente distinta en cuanto a color, textura y densidad. Similarmente ocurre en la **Tabla 7-6** con la muestra **2.ram.1**. Esto

produce de que se puedan obtener diferencias entre los resultados de la experimentación de muestras de un mismo sector, no solo por errores en la experimentación, sino también porque la madera a lo largo de un árbol no es homogénea y estructuralmente es más compleja que solo dividirla entre partes de tronco, ramas, raíces y corteza.

Como se mencionó, en general se tienen duraciones de combustión parecidas entre las muestras al estar estandarizadas, pero esto solo ocurre entre las muestras pertenecientes al mismo sector del árbol. En el 2Álamo se tienen muestras de raíces y ramas con duración de combustión de 34[s]; muestras de corteza con duración de combustión de 49[s]; muestras de tronco con duración de combustión de 62[s]. Como se observa en la tabla, el promedio de las áreas de altura relativa de Na es menor en las muestras que tienen menor tiempo de combustión como las raíces y ramas (como debería esperarse), sin embargo, no es así con respecto al K. Esto presuntamente puede estar relacionado a que, a pesar de que todas las muestras tengan la misma masa, aquellas que tienen mayor concentración de K tendrán una combustión más rápida debido a que este elemento tiene un efecto catalítico en la combustión; lo anteriormente dicho lo plantea Patrick E. Mason, et al. [15]. Entonces, el hecho de que las muestras tengan un menor tiempo de combustión es compensado con la gran amplitud de los picos de K en dichas muestras. Esto produce que tengan un área bajo la curva de las alturas relativas de K similar a todas las muestras, pero tengan menor Na.

En cuanto a la **Tabla 7-5** se observa un claro patrón en cuanto a la disminución de la proporción Na/K desde la base del tronco hasta la parte superior. Esto se debe a la disminución de la cantidad de Na constante más que a la cantidad de K que es más homogénea a lo largo del árbol. En cuanto a los resultados en lo que respecta al Na en el resto del árbol, se tiene que este incrementa de manera ascendente en el orden corteza, raíces y ramas respectivamente.

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos del tercer árbol 3Pino:

Muestras	Area aturas relativas Na	Area aturas relativas K	Na/K	Promedio de Na	Promedio de K	Na/K
3.1.1	14,52	92,92	0,16	12,71	78,14	0,16
3.1.2	8,95	75,23	0,12	12,71	78,14	0,16
3.1.3	12,69	69,75	0,18	12,71	78,14	0,16
3.1.4	14,68	74,68	0,20	12,71	78,14	0,16
3.2.1	9,84	76,19	0,13	9,77	72,89	0,13
3.2.2	8,73	74,37	0,12	9,77	72,89	0,13
3.2.3	9,07	63,56	0,14	9,77	72,89	0,13
3.2.4	11,44	77,44	0,15	9,77	72,89	0,13
3.3.1	8,21	81,81	0,10	8,11	77,21	0,11
3.3.2	9,20	85,88	0,11	8,11	77,21	0,11
3.3.3	8,94	85,30	0,10	8,11	77,21	0,11
3.3.4	6,11	55,86	0,11	8,11	77,21	0,11
3.4.1	5,91	75,96	0,08	6,90	93,33	0,07
3.4.2	7,13	111,05	0,06	6,90	93,33	0,07
3.4.3	7,66	92,97	0,08	6,90	93,33	0,07
3.rai.1	3,17	49,17	0,06	3,77	55,31	0,07
3.rai.2	4,42	59,04	0,07	3,77	55,31	0,07
3.rai.3	3,50	60,66	0,06	3,77	55,31	0,07
3.rai.4	3,98	52,38	0,08	3,77	55,31	0,07
3.ram.1	8,20	54,38	0,15	8,06	55,42	0,15
3.ram.2	7,37	53,26	0,14	8,06	55,42	0,15
3.ram.3	10,31	61,03	0,17	8,06	55,42	0,15
3.ram.4	6,34	53,02	0,12	8,06	55,42	0,15

Tabla 7-8: Tabla de resultados de área bajo la curva de las alturas relativas del pino de Yumbel. Nomenclatura en Figura 5-8.

En la **Tabla 7-8** se tienen resultados que se comportan de forma análoga a los de la **Tabla 7-5**. Se ve una clara disminución en la proporción Na/K a medida que se asciende en el árbol. Además, igualmente las raíces poseen un menor resultado de área de las alturas relativas que las ramas.

Resultados del cuarto árbol, 4Eucalipto:

Muestras	Area alturas relativas Na	Area alturas relativas K	Na/K	Promedio de Na	Prmedio de K	Na/K
4.1.1	16,46	183,54	0,09	17,70	153,14	0,12
4.1.2	18,49	182,16	0,10	17,70	153,14	0,12
4.1.3	20,54	125,85	0,16	17,70	153,14	0,12
4.1.4	15,32	120,98	0,13	17,70	153,14	0,12
4.2.1	17,63	141,53	0,12	16,82	150,21	0,11
4.2.2	19,42	176,54	0,11	16,82	150,21	0,11
4.2.3	18,96	123,89	0,15	16,82	150,21	0,11
4.2.4	11,28	158,90	0,07	16,82	150,21	0,11
4.3.1	15,32	148,78	0,10	15,53	156,87	0,10
4.3.2	14,69	160,26	0,09	15,53	156,87	0,10
4.3.3	13,79	143,49	0,10	15,53	156,87	0,10
4.3.4	18,33	174,96	0,10	15,53	156,87	0,10
4.4.1	16,28	116,41	0,14	18,47	168,65	0,11
4.4.2	19,21	185,30	0,10	18,47	168,65	0,11
4.4.3	19,85	195,12	0,10	18,47	168,65	0,11
4.4.4	18,54	177,77	0,10	18,47	168,65	0,11
4.5.1	13,59	116,22	0,12	16,35	150,02	0,11
4.5.2	15,23	113,73	0,13	16,35	150,02	0,11
4.5.3	17,38	171,61	0,10	16,35	150,02	0,11
4.5.4	19,22	198,51	0,10	16,35	150,02	0,11

Tabla 7-9: Tabla de resultados de área bajo la curva de las alturas relativas del eucalipto de Hualqui. Nomenclatura en Figura 5-8.

En la **Tabla 7-9** no se incluyen resultados de raíces, ni ramas ni corteza. Se observa que la distribución de los resultados de Na y K es mas homogénea que en las anteriores tablas, por lo que los resultados de las proporciones Na/K también son mas equilibrados. Sin embargo, se puede observar una pequeña tendencia de disminución en la proporción a medida que se asciende en el tronco, al igual que en las tablas anteriores.

7.4.3 Correlaciones

Como se pudo observar en el apartado **7.4.1 Picos de Sodio y Potasio a través del tiempo**, las alturas relativas a lo largo del tiempo presentan dinámicas similares entre las muestras provenientes de un mismo sector de un mismo árbol. Esto abre las interrogantes de que tan parecidas son realmente las dinámicas de las muestras de un mismo árbol entre sí y que tan semejantes o diferentes pueden llegar a ser las dinámicas entre muestras de distintos árboles.

Para esto, se procede a realizar correlaciones lineales (correlación de Pearson), entre todas las combinaciones de muestras recolectadas de todos los sectores en un mismo árbol y entre árboles

distintos. Para realizar esto se deben tener vectores de datos con la misma dimensión entre sí, ya que la correlación lineal compara punto a punto que tan semejante son dos vectores entre sí. Sin embargo, debido que a pesar de que las muestras están estandarizadas en masa y deberían tener un tiempo de combustión muy similar, las combustiones de las muestras de un árbol difieren en duración de tiempo entre ellas (entre algunas muestras más que entre otras). Es por esto, que se utiliza una interpolación por spline cúbico; este método en particular es adecuado de usar para este caso, debido a que se necesita una buena adaptabilidad en las transiciones suaves que tenga la curva que se desea interpolar. Es importante señalar que existen algunas transiciones que no son muy suaves en los gráficos de las alturas relativas a través del tiempo, pero la mayoría lo son.

La interpolación por **spline cubica** se realizó con la función de Matlab “*spline*” y el vector resultante de dichas interpolaciones tiene una longitud que es el promedio de la longitud de tiempo de todas las muestras en la que se realizaran las correlaciones; esto es evidente ya que el objetivo de aplicar el spline cubico es que los vectores tengan una misma dimensionalidad para poder aplicar una correlación. En las siguientes figuras se puede apreciar como un gráfico de alturas relativas se adapta de muy buena manera en cuanto a forma y magnitud a las dimensiones del vector promedio de tiempo al cual queremos llegar con la interpolación.

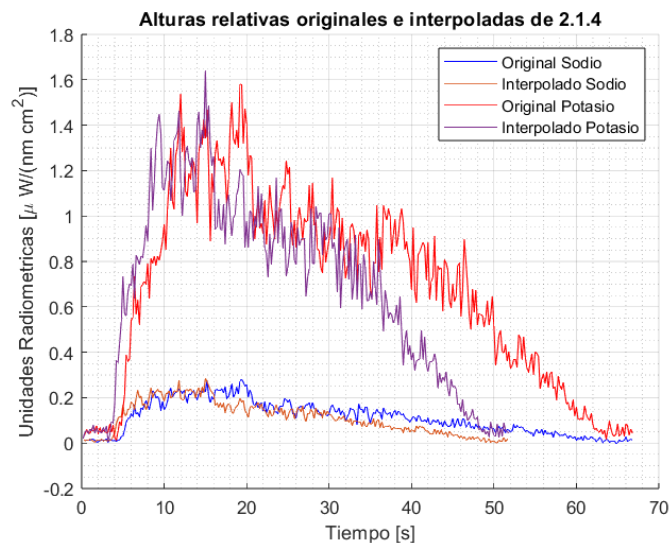


Figura 7-23: Alturas relativas originales e interpoladas de 2.1.4. Nomenclatura en Figura 5-8.

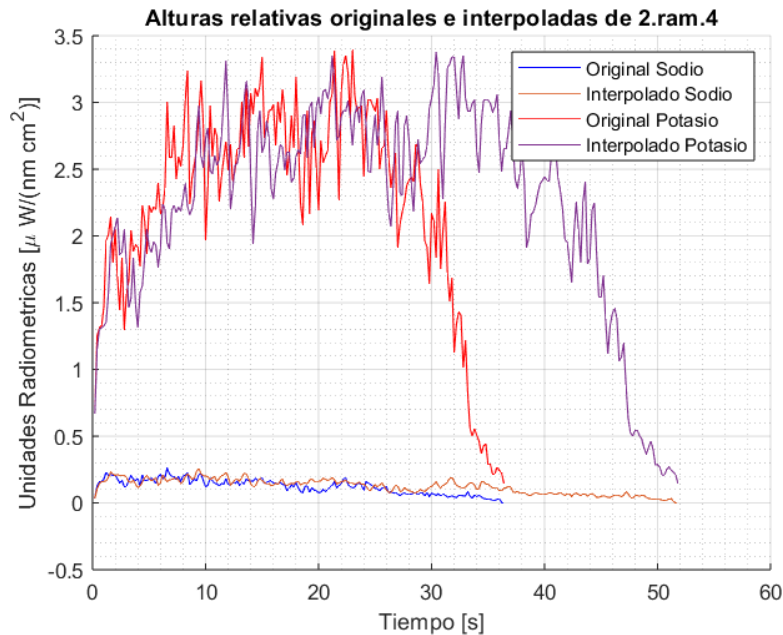


Figura 7-24: Alturas relativas originales e interpoladas de 2.ram.4. Nomenclatura en Figura 5-8.

Como se mencionó, en general se tienen duraciones de combustión parecidas entre las muestras al estar estandarizadas, pero esto solo ocurre entre las muestras pertenecientes al mismo sector del árbol. Esto se puede apreciar en las últimas figuras mostradas, ya que, el largo del vector de interpolación que se escoge es el que promedia el largo del vector de tiempo de todas las muestras de un árbol. Como la duración de combustión es bastante menor en muestras como raíces y ramas en comparación con las del tronco, entonces el tiempo de combustión promedio estará más alejado de cada muestra.

Se procede entonces a efectuar un análisis de la correlación que existe de los resultados obtenidos de las alturas relativas del K entre distintos árboles. En la **Tabla 11-1** de la sección **11 Anexo** se observan todas las combinaciones posibles de correlación que pueden efectuarse entre todos los sectores de todos los árboles que se recolectaron para este estudio.

Para una observación mas fácil de los resultados, se escogen las muestras pertenecientes a la tercera sección de tronco de cada árbol y se tabulan los resultados de las correlaciones obtenidas en la siguiente tabla:

	1.3	2.3	3.3	4.3	5.3	6.3
1.3	1	0,970	0,973	0,921	0,976	0,924
2.3	0,970	1	0,978	0,954	0,954	0,951
3.3	0,973	0,978	1	0,957	0,959	0,953
4.3	0,921	0,954	0,957	1	0,885	0,986
5.3	0,976	0,954	0,959	0,885	1	0,888
6.3	0,924	0,951	0,953	0,986	0,888	1

Tabla 7-10: Tabla de correlaciones de la tercera sección de tronco entre distintos árboles. Nomenclatura en Figura 5-8.

8 Conclusiones

En este estudio se analizó el comportamiento del espectro de los elementos de Na y K a lo largo de la estructura de un árbol (de diferentes especies y provenientes de distintos lugares), al quemar las muestras en un ambiente controlado. Al experimentar con múltiples muestras de madera y promediando estos resultados por sección de árbol, se obtuvo lo siguiente:

1. Primer Álamo de Yumbel: Aparentemente a lo largo del tronco no se observó ningún patrón en cuanto a la proporción de Na/K a lo largo de diferentes cortes del tronco. Sin embargo, en cuanto a las áreas de las alturas relativas promediadas por sector de Na y de K, se observó que tienen un comportamiento similar (cuando aumenta el Na, también aumenta el K).
2. Segundo Álamo de Yumbel: En esta ocasión si se observó un patrón en común. La proporción de Na/K disminuye constantemente a lo largo del árbol. Esto se debe mayoritariamente a que las áreas de las alturas relativas de Na van disminuyendo a medida que se asciende en el tronco
3. Pino de Yumbel: Se repite el mismo patrón de disminución de la proporción de Na/K a medida que se asciende en el tronco.
4. Eucalipto de Hualqui: Se ve una ligera disminución en la proporción de Na/K a medida que se asciende en el tronco.

Con respecto a la corteza es interesante notar que, en los dos álamos se tienen valores de Na bastante bajos y, por lo tanto, los menores valores de proporción Na/K. Esto es esperable debido a que la corteza sirve principalmente como capa protectora y no está involucrada en procesos metabólicos como la fotosíntesis o el transporte activo de nutrientes.

Se observó además que el contenido de Na disminuye de manera constante a medida que se asciende a lo largo del tronco hasta llegar a las ramas. No así el contenido de K que se mantiene de manera constante incluso en las ramas. A pesar de que la duración de combustión de las muestras de las ramas es menor que la del tronco, la magnitud de las áreas bajo las curvas de las alturas relativas es semejante (intuitivamente deberían ser menor). Esto se debe a que el K es un elemento catalítico en el proceso de combustión, y una mayor concentración de este (mayor intensidad de sus alturas relativas a lo largo del tiempo) compensaría el menor tiempo de combustión de estas muestras. Es razonable obtener estos resultados, ya que, las hojas son una componente que utiliza el K para tener una mayor apertura en

sus estomas y, por lo tanto, una mejor regulación de intercambio gaseoso (esto incluye la entrada de dióxido de carbono (CO₂) y la salida de oxígeno (O₂) y vapor de agua). De manera general, se tienen evidentes diferencias nutricionales entre el tronco y, las raíces y corteza. Las ramas son más parecidas a los troncos.

Es posible que en árboles como 1Álamo o 4Eucalipto no se hayan encontrado patrones en la distribución de los resultados, a diferencia de los demás árboles, por las siguientes razones:

- Diferencias en la naturaleza de las muestras: la composición química de determinada muestra de madera varía dependiendo no solo del sector del árbol de donde se extrae, si no también, dentro del mismo sector puede variar dependiendo de la utilidad específica que tenga. Es el caso de la muestra 2.rai.5, que a pesar de ser una muestra de raíz como las demás, se diferenciaba claramente con respecto al resto de las muestras de raíces en términos de color y densidad (de apariencia en general). En un corte transversal de tronco también se puede encontrar que la madera varía de naturaleza según su función, por ejemplo, entre la albura y el duramen.
- Diferencias en la preparación de las muestras: a pesar de que se intentó estandarizar las muestras de la mejor manera en cuanto a forma, tamaño y masa, es posible que no todas hayan sido estandarizadas de forma ideal.
- Diferencias experimentales: la sensibilidad de enfoque del lente colimador en el set-up es muy alta, por lo que un pequeño desvío entre la experimentación de un día y la del otro, puede conllevar a recibir una diferente magnitud espectral entre cada experimento.

En cuanto a las correlaciones, se ve una tendencia de mayores valores entre árboles provenientes del mismo lugar. Entre los árboles provenientes de Yumbel se tienen valores de aproximadamente 0.97. El Álamo proveniente de Yungay también tiene una buena correlación con los árboles de Yumbel (entre 0.95 a 0.97), independientemente de si es pino o álamo. Además, los árboles que pertenecen a Yumbel tienen valores de correlación similares con el resto de los demás árboles. A diferencia del eucalipto de Hualqui, que tiene buena correlación con los árboles de Yumbel y el roble de Linares, pero mala correlación con el álamo de Yungay. Lo anteriormente comprueba que aparentemente hay una relación entre la dinámica de las alturas relativas del K entre árboles que se encuentran geolocalizados en lugares con suelos y ecosistemas que poseen características nutricionales parecidas. No hay una relación aparente entre árboles de la misma especie. Sin embargo, puede que no sea

suficiente estudiar solo el comportamiento de la dinámica de las alturas relativas del K para tener resultados que indiquen con certeza que determinado árbol provenga del mismo lugar que otro árbol a analizar. Para ello sería pertinente reunir un conjunto de diversas métricas que analicen distintos elementos de un árbol, para así, tener más resultados que puedan describir más características de determinado árbol que provenga de determinado lugar.

Por último, hay que señalar que en general se poseen altos valores de correlación entre todas las muestras debido a que todas son de madera y como se explicita en Patrick E. Mason, et al. [15], existen patrones en cuanto a lo que respecta el comportamiento del espectro de emisión de K en la combustión de madera.

9 Trabajos Futuros

A lo largo de este proyecto, se ha logrado establecer una metodología robusta para el análisis del espectro de emisión de sodio y potasio en muestras de madera utilizando técnicas de espectroscopía óptica. Sin embargo, como todo estudio científico, este trabajo abre la puerta a diversas líneas de investigación que podrían extender y profundizar los hallazgos aquí presentados. Además, como se mencionó en la sección de **3.3 Limitaciones**, esta Memoria de Título es perfectible en diversos factores. Disponer de una gran cantidad de muestras a lo largo de múltiples árboles, ayudará a que los resultados caractericen nutricionalmente de mejor forma la estructura de un árbol. Además, disponer de una gran cantidad de muestras de lugares alejados entre sí y que posean suelos con características nutricionales muy diversas, ayudará a identificar diferencias espectrales más grandes entre árboles provenientes de ecosistemas diversos entre sí. Junto con lo anteriormente dicho, implementar modelos de aprendizaje automático que puedan predecir la procedencia geográfica del árbol. Además, el incluir un análisis químico de la tierra donde provienen los árboles y relacionar estos resultados con los obtenidos de los mismos árboles, podría proporcionar resultados aún más concluyentes en lo que respecta a la procedencia de la madera

Además, se propone la creación de una base de datos que contenga los espectros de diferentes árboles de diferentes lugares de procedencia. Con esto, se podría lograr establecer una rápida correlación entre la muestra que se está analizando con la base de datos y obtener rápidamente información del lugar donde proviene el árbol en cuestión.

También, analizar a cabalidad las razones del por qué muestras de un mismo árbol con la misma masa, tienen tiempos de combustión tan diferentes entre sí.

Combinar análisis espectrales con imágenes hiperespectrales o multiespectrales, podría proporcionar una herramienta más poderosa y completa para la caracterización de la madera.

Finalmente, el desarrollo de un dispositivo portátil basado en el diseño de un espectrómetro, para realizar pruebas de campo in situ, sería de gran ayuda para que el análisis sea más viable y rápido que técnicas de laboratorio que puedan demorar más tiempo.

10 Bibliografía

- [1] V. De La Rubia, “Description of Microwave Circuits via the Reduced-Basis Method Giving Physical Insight,” *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 70, no. 11, pp. 10554–10568, Nov. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3206536.
- [2] A. M. Avery, M. Fawaz, L. R. Williams, T. Bond, and T. B. Onasch, “Chemically Distinct Particle-Phase Emissions from Highly Controlled Pyrolysis of Three Wood Types,” *Atmos Chem Phys*, vol. 23, no. 15, pp. 8837–8854, Aug. 2023, doi: 10.5194/acp-23-8837-2023.
- [3] J. Darido *et al.*, “Emissions from a Domestic Wood Heating Appliance: Experimental Measurements and Numerical Study Using an Equivalent Reactor Network (ERN) Approach Coupled with a Detailed Chemical Mechanism,” *Chemical Mechanism. Energy & Fuels*, vol. 35, pp. 18680–18698, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c01927i.
- [4] Sneddon Joseph, “Advances in Atomic Spectroscopy,” *Elsevier*, vol. 5, 2000, [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja9957985>
- [5] H. Spiering *et al.*, “Advances in Mössbauer Emission Spectroscopy,” 1990.
- [6] J. Marshall, S. Cheneryc, E. H. Evansb, and A. Fisherb, “Atomic Spectrometry Update-Atomic emission spectrometry,” 1998. [Online]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1998/ja/a803768j>
- [7] G. Castro *et al.*, “Application of Optical Emission Spectroscopy to High Current Proton Sources,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Jul. 2017. doi: 10.1088/1742-6596/874/1/012033.
- [8] S. N. Thakur, “Atomic Emission Spectroscopy,” in *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, Second Edition*, Elsevier, 2020, pp. 23–40. doi: 10.1016/B978-0-12-818829-3.00002-2.
- [9] L. G. S. M. Robert Dillon, “Laser-Triggered Plasma Apparatus for Atomic Emission Spectroscopy,” 2010.
- [10] S. Nasu, “General Introduction to Mössbauer Spectroscopy,” in *Mössbauer Spectroscopy*, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 1–22. doi: 10.1007/978-3-642-32220-4_1.

- [11] M. Lim, A. Zulazalan, S. Zulkifli, and H. Hassan, "Biomass Combustion: Potassium and Sodium Flame Emission Spectra and Composition in Ash," 2016.
- [12] F. Castillo, J. Cifuentes, M. Marín, L. Arias, and H. Garces, "Study spectral emission of burning biomass in the VIS and NIR spectral band," in *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2017 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/CHILECON.2017.8229667.
- [13] T. Blomberg, "A thermodynamic study of the gaseous potassium chemistry in the convection sections of biomass fired boilers," *Materials and Corrosion*, vol. 62, no. 7, pp. 635–641, Jul. 2011, doi: 10.1002/maco.201005880.
- [14] J. N. Knudsen, P. A. Jensen, and K. Dam-Johansen, "Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass," *Energy and Fuels*, vol. 18, no. 5, pp. 1385–1399, Sep. 2004, doi: 10.1021/ef049944q.
- [15] P. E. Mason, L. I. Darvell, J. M. Jones, and A. Williams, "Observations on the Release of Gas-Phase Potassium During the Combustion of Single Particles of Biomass," *Fuel*, vol. 182, pp. 110–117, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.05.077.
- [16] R. A. Ananías, R. Sarzosa, G. Janin, Genka Bluskova, and J. Goncalez, "Apreciación cuantitativa del color de la madera por colorimetría. Parte 2: Mediciones de los cambios de color en Pino Radiata (*Pinus Radiata*) secado bajo un programa convencional acelerado," 2003. [Online]. Available: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2003000200007&lng=pt&nrm=iso&tlng=es
- [17] T. C. M. Pastore, "NIRS: Banco de espectros del infrarrojo cercano de maderas de especies similares," 2021.
- [18] A. Sandak, J. Sandak, and M. Negri, "Relationship Between Near-Infrared (NIR) Spectra and the Geographical Provenance of Timber," *Wood Sci Technol*, vol. 45, no. 1, pp. 35–48, Feb. 2011, doi: 10.1007/s00226-010-0313-y.
- [19] A. Sandak *et al.*, "Potential of Mid and Near Infrared Spectroscopy for Geographical Origin Recognition of Forest-Based Biomasses," 2010. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/270816662>

- [20] S. Gul, Z. Shaheed Siddiqui, and F. Rasheed, “Tree Anatomy and Physiology,” 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319306758>
- [21] N. T. Sandberg, “Handbook of Wood Science and Technology,” 2023.
- [22] He. Young and V. P. Guinn, “Chemical elements in complete mature trees of seven species in Maine.,” vol. 49, no. 5, 1966.
- [23] A. J. Kühn, W. H. Schröder, and J. Bauch, “On the Distribution and Transport of Mineral Elements in Xylem, Cambium and Phloem of Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.),” 1997.
- [24] G. Masson, M. T. Cabanis, J. C. Cabanis, and J.-L. Puech, “The Amounts of Inorganic Elements in Cooperage Oak,” 1997.
- [25] P. Battie-Laclau *et al.*, “Photosynthetic and Anatomical Responses of *Eucalyptus Grandis* Leaves to Potassium and Sodium Supply in a Field Experiment,” *Plant Cell Environ*, vol. 37, no. 1, pp. 70–81, 2014, doi: 10.1111/pce.12131.
- [26] P. Battie-Laclau *et al.*, “Effects of Potassium and Sodium Supply on Drought-Adaptive Mechanisms in *Eucalyptus Grandis* Plantations,” *New Phytologist*, vol. 203, no. 2, pp. 401–413, 2014, doi: 10.1111/nph.12810.
- [27] Fernando Leal Pérez, “Fisiología Vegetal: Parte III - Nutrición Mineral,” 2017.
- [28] M. González *et al.*, “Efecto de la concentración de fósforo y calcio sobre atributos morfo-fisiológicos y potencial de crecimiento radical en plantas de *Aextoxicon punctatum* producidas a raíz cubierta en la etapa de endurecimiento,” *Bosque*, vol. 41, no. 2, pp. 137–146, 2020, doi: 10.4067/S0717-92002020000200137.
- [29] V. Sierra *et al.*, “NIRWOOD: an EU Innovation Project to Determine Species and Geographical Origin of Timber Using NIR Spectrometry,” 2017. [Online]. Available: www.spectrapply.com
- [30] J. Ruiz, M. A. Peredo, J. Rodríguez, J. Baeza, and J. Freer, “Aplicación de la Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIR) en la Industria Forestal: Clasificación de Maderas de *Eucalyptus* y Predicción de Propiedades,” 2012.
- [31] Y. Li, B. K. Via, T. Young, and Y. Li, “Visible-Near Infrared Spectroscopy and Chemometric Methods for Wood Density Prediction and Origin/Species Identification,” *Forests*, vol. 10, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.3390/F10121078.

- [32] R. Baettig, P. Perré, and R. Rémond, “Aplicación de Espectrometría de Rayos X para el Estudio de la Madera: Algunos Resultados Iniciales. X-Rays Spectrometric Methods for Wood Properties Determination: Some Initial Results,” *Ciencia y tecnología*, vol. 9, no. 3, pp. 271–283, 2007.
- [33] M. E. Jiménez Heinert, A. de las M. Grijalva Endara, and H. X. Ponce Solórzano, “Plasma Acoplado Inductivamente en Espectroscopia de Emisión Óptica (ICP-OES),” *RECIMUNDO*, vol. 4, no. 4, pp. 4–12, Oct. 2020, doi: 10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12.
- [34] J. Padilla-Cuevas, H. T. Yee-Madeira, A. Merino-García, C. Hidalgo, and J. D. Etchevers, “Análisis de los Elementos Minerales Esenciales y Tóxicos en Tejidos Vegetales,” *Agrociencia*, vol. 54, no. 3, pp. 413–434, Dec. 2020, doi: 10.47163/agrociencia.v54i3.1916.
- [35] S. Douglas A, W. Donald M, H. F. James, and C. Stanley R., “Fundamentals of Analytical Chemistry,” 2013.
- [36] L. Gerald F., “Analytical Chemistry: An Introduction,” 1985.
- [37] I. Morison, “Introduction to Astronomy and Cosmology,” 2008.
- [38] G. David F., “The Observation and Analysis of Stellar Photospheres,” 2021.
- [39] M. S. Cresser, “Flame Spectrometry in Environmental Chemical Analysis: a practical guide,” 1994.
- [40] C. Alonso, V. Moreno, and E. Rodríguez, “Determinación experimental de la Firma Espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la Teledetección,” 1999.
- [41] M. Y. Lai, “The Study of Fire Spread on an Inclined Wooden Surface by Multiple Spectrum Imaging Systems and Diagnostical Techniques,” 2021.
- [42] Ocean Optics, “Halogen Light Source Installation and Operation Manual,” 2009.
- [43] AmyLisk, “Flame Miniature Spectrometer User Manual,” 2015. [Online]. Available: www.oceanoptics.com
- [44] Ocean Insight, “84-UV-25 Collimating Lens.” Accessed: Apr. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.oceaninsight.com/products/sampling-accessories/free-space-optics/collimating-lenses/84-uv-25/?qty=1>

- [45] G. Michael G, "Spectrophotometry and Spectrofluorimetry," 2000. [Online]. Available: <http://www.oup.co.uk/pas>

11 Anexo

11	1	0.714	0.673	0.930	0.830	0.471	0.907	0.706	0.624	0.827	0.965	0.326	0.823	0.904	0.801	0.838	0.524	0.444	0.880	0.988	0.919	0.486	0.517	0.707	0.691	0.709	0.704	0.123	0.736	0.880	0.934	
12	0.714	1	0.615	0.676	0.466	0.499	0.776	0.561	0.434	0.511	0.326	0.477	0.677	0.612	0.624	0.536	0.479	0.729	0.799	0.446	0.465	0.517	0.707	0.691	0.709	0.704	0.123	0.736	0.880	0.934		
13	0.673	0.615	1	0.977	0.828	0.470	0.718	0.476	-0.025	0.940	0.661	0.262	0.787	0.914	0.855	0.676	0.204	0.526	0.679	0.729	0.799	0.446	0.465	0.517	0.707	0.691	0.709	0.704	0.123	0.736	0.880	0.934
14	0.930	0.676	0.977	1	0.777	0.221	0.736	0.915	0.612	0.936	0.788	0.919	0.899	0.914	0.911	0.911	0.847	0.916	0.935	0.886	0.846	0.847	0.861	0.862	0.846	0.847	0.833	0.944	0.831	0.789	0.912	
15	0.830	0.466	0.828	0.777	1	0.947	0.771	0.670	0.944	0.826	0.644	0.703	0.861	0.898	0.706	0.729	0.661	0.713	0.729	0.738	0.741	0.220	0.463	0.615	0.620	0.620	0.656	0.833	0.777	0.657	0.949	
16a	0.907	0.716	0.748	0.736	0.771	0.517	1	0.737	0.914	0.892	0.861	0.709	0.894	0.941	0.873	0.710	0.333	0.577	0.767	0.853	0.927	0.414	0.400	0.567	0.588	0.389	0.610	0.821	0.854	0.886	0.949	
16m	0.706	0.524	0.405	0.920	0.670	0.877	0.927	1	0.677	0.833	0.547	0.238	0.498	0.624	0.554	0.620	0.240	0.423	0.584	0.924	0.736	-0.061	0.207	0.106	0.227	0.126	0.125	0.251	0.320	0.549	0.622	0.924
21	0.42	0.143	0.015	0.023	0.042	0.228	0.043	0.047	1	-0.05	0.046	-0.020	0.027	0.029	0.081	-0.045	-0.011	0.023	0.023	0.070	0.070	-0.210	-0.110	-0.025	0.120	-0.025	0.120	-0.025	0.120	0.118	0.029	
22	0.821	0.511	0.940	0.935	0.826	0.277	0.827	0.883	-0.035	1	0.575	0.879	0.756	0.809	0.800	0.879	0.791	0.883	0.886	0.843	0.728	0.495	0.702	0.845	0.848	0.838	0.418	0.416	0.820	0.690	0.949	
23	0.676	0.536	0.650	0.621	0.644	0.449	0.620	0.547	0.646	0.575	1	0.877	0.611	0.616	0.623	0.653	0.511	0.529	0.723	0.725	0.676	0.493	0.277	0.478	0.442	0.287	0.491	0.229	0.620	0.612	0.948	
24	0.829	0.677	0.925	0.925	0.703	0.086	0.709	0.938	-0.020	0.979	0.907	1	0.719	0.944	0.856	0.927	0.717	0.865	0.936	0.888	0.720	0.686	0.820	0.918	0.884	0.926	0.980	0.407	0.827	0.747	0.916	
25	0.823	0.612	0.787	0.788	0.861	0.238	0.829	0.698	0.077	0.756	0.611	0.719	1	0.801	0.781	0.783	0.564	0.677	0.834	0.827	0.713	0.414	0.620	0.704	0.688	0.686	0.715	0.423	0.854	0.743	0.929	
26a	0.924	0.814	0.824	0.929	0.828	0.267	0.824	0.521	0.929	0.829	0.616	0.824	0.820	1	0.855	0.888	0.555	0.729	0.919	0.920	0.827	0.524	0.656	0.829	0.825	0.826	0.824	0.228	0.925	0.829	0.924	
26m	0.921	0.825	0.826	0.929	0.706	0.266	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	1	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825	
27m	0.828	0.676	0.924	0.911	0.729	0.223	0.729	0.729	-0.045	0.879	0.681	0.927	0.753	0.888	0.820	1	0.765	0.913	0.940	0.920	0.744	0.586	0.757	0.829	0.828	0.828	0.447	0.827	0.827	0.735	0.820	
31	0.524	0.204	0.772	0.671	0.661	-0.291	0.232	0.066	-0.021	0.791	0.511	0.727	0.524	0.525	0.527	0.765	1	0.866	0.736	0.288	0.266	0.475	0.723	0.771	0.749	0.736	0.728	0.744	0.583	0.289	0.286	
32	0.24	0.526	0.928	0.927	0.713	0.007	0.577	0.420	-0.011	0.893	0.929	0.885	0.927	0.729	0.913	0.866	1	0.946	0.826	0.827	0.921	0.772	0.922	0.827	0.848	0.949	0.543	0.763	0.642	0.820		
33	0.820	0.679	0.948	0.926	0.733	0.813	0.787	0.433	-0.033	0.826	0.723	0.926	0.824	0.919	0.883	0.940	0.756	0.926	1	0.941	0.828	0.611	0.754	0.826	0.824	0.826	0.440	0.920	0.824	0.920		
34	0.928	0.729	0.926	0.925	0.728	0.241	0.855	0.924	0.023	0.843	0.726	0.888	0.822	0.920	0.924	0.920	0.828	0.826	0.924	1	0.920	0.529	0.829	0.820	0.820	0.726	0.821	0.226	0.926	0.826	0.926	
34m	0.626	0.446	0.538	0.521	0.220	-0.209	0.414	-0.108	0.121	0.425	0.403	0.626	0.424	0.924	0.622	0.926	0.475	0.521	0.611	0.529	0.487	1	0.629	0.627	0.711	0.624	0.624	0.578	0.541	0.297	0.828	
34n	0.629	0.729	0.728	0.926	0.741	0.544	0.927	0.729	0.070	0.728	0.629	0.729	0.921	0.927	0.927	0.74	0.526	0.627	0.828	0.927	1	0.820	0.820	0.822	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	
41	0.527	0.281	0.727	0.727	0.423	-0.268	0.420	-0.100	-0.110	0.720	0.287	0.820	0.626	0.827	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	0.727	
42	0.707	0.526	0.826	0.821	0.623	-0.233	0.526	0.526	-0.035	0.826	0.426	0.824	0.626	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	
43	0.729	0.529	0.826	0.821	0.620	-0.161	0.528	0.515	-0.127	0.824	0.287	0.916	0.626	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	
44	0.729	0.529	0.826	0.821	0.620	-0.161	0.528	0.515	-0.127	0.824	0.287	0.916	0.626	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	
45	0.724	0.525	0.826	0.827	0.626	-0.148	0.620	0.511	-0.066	0.828	0.286	0.820	0.725	0.924	0.829	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	0.828	
53	0.223	-0.111	0.422	0.223	0.283	-0.238	0.021	-0.209	-0.135	0.426	0.229	0.407	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	0.423	
62a	0.820	0.726	0.826	0.821	0.627	0.277	0.824	0.920	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	
62b	0.824	0.721	0.922	0.920	0.821	0.528	0.929	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	0.921	

Tabla 11-1: Tabla resumen de todas las correlaciones posibles entre todas las muestras de este estudio.