

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:
Luis E. Arias Parada PhD.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil en Telecomunicaciones

**Uso de espectrofotómetros en el SWIR para
estimación de temperatura usando Ley de
desplazamiento de Wien.**

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Luis E. Arias Parada PhD.

USO DE ESPECTROFOTÓMETROS EN EL SWIR PARA ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA USANDO LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN.

Pedro Andrés Eriz Aguilera.

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil en Telecomunicaciones

Septiembre de 2022

Resumen

En la presente memoria de título se realiza una evaluación de rendimiento de los radiómetros NIR 512 de Ocean Optics y el ATP 8000 de Optosky para la adquisición de espectros de llamas de biomasa con el fin de estimar temperatura utilizando la Ley de desplazamiento de Wien. La técnica implementada para estimar temperatura es comparada por el método de dos longitudes de ondas aplicado en el rango VIS, el cual debido a la existencia de bandas de emisión y absorción predominantes, resulta no ser un método apropiado.

La ley de desplazamiento de Wien relaciona la temperatura de un cuerpo negro, con la longitud de onda donde ocurre el máximo peak de emisión. El espectro en el short wave infrared (SWIR) emitido por una llama al quemar biomasa posee un comportamiento similar a un cuerpo negro, con máximos de radiación entre los 1600-2000 [nm], pese a la emisividad y a la presencia de bandas de absorción y emisión. Por lo tanto, en este trabajo se propone realizar un ajuste de curva de cuerpo negro ideal, sobre los espectros medidos en el SWIR con dos instrumentos (NIR512 de Ocean Optics y ATP8000 de Optosky). De esta manera se aplica la ley de desplazamiento de Wien para estimar temperatura de llama de biomasa.

La comparación de equipos contempló la medición del ruido base del radiómetro y la adquisición de señal proveniente de la combustión de madera. Experiencia donde el NIR 512, de menor rango espectral presentó un mejor rendimiento, ya que el radiómetro de Optosky mostró una alta sensibilidad al ruido provocado por la temperatura de la combustión.

Las mediciones espectrales finales fueron realizadas por el equipo de Ocean Optics para muestras de madera de la especie pino radiata efectuadas en una mufla. Dicha investigación tuvo lugar en el Laboratorio SP&R de la Universidad de Concepción. Las estimaciones de temperatura fueron comparadas entre ambos métodos, obteniendo resultados similares y corroborando la eficiencia de nuestra técnica. Además, se visualiza la presencia de bandas de emisión de los compuestos sodio y potasio, junto a la presencia de la banda de absorción del agua.

Los resultados del proyecto nos permiten acreditar que la estimación de temperatura mediante la Ley de desplazamiento de Wien es un método más efectivo que el método de dos longitudes de onda, el cual opera bajo suposiciones y la omisión de bandas de emisión y/o absorción. Finalmente, se propone como trabajo a futuro la mejora del setup de adquisición,

modificando el espectrofotómetro ATP 8000 mediante un cambio de su rendija, ya que posee mayor rango espectral.

Agradecimientos

Todo el trabajo realizado hasta la fecha realmente no lo vi como una investigación o un informe más, sino que lo asocié como a mi última (o momentáneamente) instancia en la Universidad, lugar que tanto amo y seguiré haciéndolo, es un campus muy bonito que irradia inspiración y una paz enorme, personalmente, mi lugar favorito de la Ciudad. Como existieron tiempos muertos en esta investigación, aproveché de descansar, solucionar pequeños problemas internos, realizar ayudantías, actividades que llenaban enormemente mi corazón, siempre quise realizar esta actividad para ayudar a otros, sentirme más persona y verme capaz de poder enseñarle a los demás. Me gustaría destacar la gentileza y el buen trato de Don Luís quien nos dio acceso a los laboratorios, nos visitaba en época de verano, nos cuidaba y nos enseñó lo básico del laboratorio, gracias por regalarnos ese tarrito de café que nos salvó del frío y nos brindó motivación para trabajar, muchísimas gracias.

Durante toda mi instancia en la Universidad compartí con muchas personas por el "mestizaje" que se vive en los primeros años en ingeniería pero una vez acabado este punto y acercándome más a la carrera conocí a mis compañeros, quienes fueron clave en este proceso, a mis amigos más cercanos de la U: Jony, Claudio y Mapache, gracias por esos ratitos de estudio, enojo, traiciones, salidas y vivencias que compartimos, llenaban mi corazón. Muchas gracias chiquillos, los quiero un montón, sé que a su manera serán unas excelentes personas y profesionales, les tengo toda la fe del mundo. Por otra parte, en esta última instancia formé un vínculo muy bonito y cercano con mi compañero de laboratorio, Víctor, con quien echábamos la talla, trabajábamos, no tanto pero lo intentábamos, formamos una amistad bastante bonita y cercana. Lo quiero socio, sé que es capaz de muchas cosas, solo tiene que trabajar un poco más su personalidad pero es capaz de todo. De igual manera, agradecer a todos mis otros compañeros y compañeras con quienes compartí, es un bonito ambiente el que se vive en la carrera.

Hablando un poco más serio, tengo una gran admiración a la disciplina, al talento innato, la inteligencia y la dedicación, todos mis profesores compartían estas cualidades en diferentes grados de intensidad, todos eran secos, genios, los admiro a todos, me gustaría ser como ellos. Destaco particularmente al Profesor Arias, profe, gracias por darme la oportunidad de trabajar con usted, una calidad de persona enorme, un trato gentil y sincero, fue muy grato trabajar con usted, entrega una calma y una paz que me sorprende varias veces. Es una excelente persona y un gran docente, muchísimas gracias por la oportunidad, los consejos, sus experiencias de vida,

AGRADECIMIENTOS

todo ello me motiva a seguir adelante. Mención especial al Profesor Pezoa, quien partió hace poco de manera sorpresiva, si bien, soy sincero, no compartíamos tanto y no me agradaba tanto como persona, le tengo una gran admiración, sin duda un genio, una persona muy trabajólica y ordenada, lamento mucho su partida.

Para culminar, agradecer a mi familia, mi papá, mamá y hermana, quienes no entendían a veces mis momentos de ansiedad, tristeza o frustración, pero siempre me daban apoyo y ganas de seguir adelante, a pesar de todos los problemas, su amor, cariño y paciencia fueron la receta para llegar a este punto. Los amo para toda la vida, son mi principal pilar. Finalmente, en una etapa delicada de salud, conté con el apoyo de mis amigos y amigas que la vida te entrega, Sebastián, Santiago, Felipe, Constanza y Ángélica, gracias por esas visitas, por su tiempo y cariño pude superar esta amarga situación, gracias de corazón, los tengo siempre presente.

Gracias a la vida por todas las experiencias, me hicieron madurar y formar mi carácter, y a esa extraña sensación de sentir que puedo lograr todo con dedicación y esfuerzo. Sé que se pueden lograr los objetivos, soy prueba viva de ello. Un gran abrazo a todas y todos desde lo más profundo de mi corazón.

Finalmente, todo el trabajo desarrollado fue financiado por proyecto Fondecyt 1211184. Enormemente agradecido por la oportunidad y la experiencia de formar parte de un proyecto así.

Gracias a todos.

Índice General

Resumen	I
Agradecimientos	III
Índice de Figuras	VII
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis de Trabajo	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivo específico	2
1.3. Alcances y Limitaciones	3
1.4. Metodología	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Radiometría	5
2.2. Espectro Electromagnético	6
2.3. Radiancia	6
2.4. Radiación de Cuerpo Negro	7
2.5. Ley de Wien	8
2.6. Método dos longitudes de onda	9
2.7. Teoría Espectral de la Llama	9
2.8. Goodness-of-fit Coefficient (GFC)	9
2.9. Espectrofotómetro Óptico	10
2.10. Johnson-Nyquist Noise	11
2.11. Responsividad	12
2.12. Generación y Recombinación	13
3. Desarrollo Experimental	14
3.1. Espectrofotómetros ATP-8000 v/s NIR 512	14
3.1.1. Estudio de ambos Espectrofotómetros	16
3.1.2. Calibración Radiométrica ATP-8000	22
3.1.3. Calibración NIR 512	26

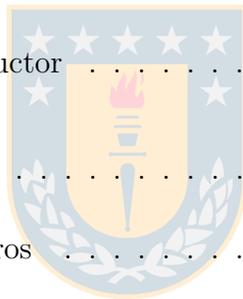


4. Adquisición y Procesamiento de Datos	28
4.1. Experiencia Espectrofotómetros	28
4.1.1. Medición experimental ATP 8000	28
4.2. Explicación física ruido ATP 8000	31
4.3. Set-up Óptico Mediciones Finales	33
4.3.1. Mediciones NIR 512	34
4.4. Estimación de Temperatura utilizando ambos Métodos	43
5. Conclusiones	47

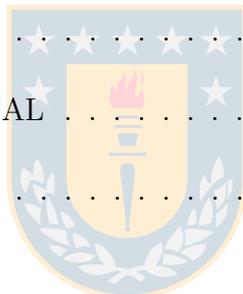


Índice de Figuras

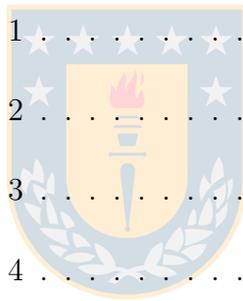
1.1. Diagrama Metodología de Trabajo	4
2.1. Espectro Electromagnético	6
2.2. Radiancia	6
2.3. Ley de Planck, Radiancia espectral de cuerpos negros cobre	8
2.4. Estructura Espectrofotómetro	10
2.5. Estructura interna Espectrofotómetro	11
2.6. Diagrama Interno Semiconductor	13
3.1. Espectrofotómetros	14
3.2. Parámetros espectrofotómetros	15
3.3. Dark noise signal NIR 512 Ocean Optics	16
3.4. Dark noise signal ATP 8000 Optosky	16
3.5. Comparación Spectrum Dark Deducted OFF v/s ON	17
3.6. Ruido Medición sin Calibrar, $T_i = 100[\text{ms}]$	18
3.7. Zoom: Ruido Medición sin Calibrar	18
3.8. Crecimiento del ruido (en área) a través del tiempo de tiempo	19
3.9. Crecimiento relación temperatura/luz 10minutos	20
3.10. Crecimiento relación temperatura/luz 20minutos	20
3.11. Crecimiento relación temperatura/luz 30minutos	21



3.12. Crecimiento relación temperatura/luz 40minutos	21
3.13. ATP-8000 Spectrometer Optosky	23
3.14. 63350 - 1000W QTH Source Lamp	24
3.15. 69931 Digital Radiometric Power Supply.	24
3.16. Espectro de irradiancia Fuente de Calibración	24
3.17. Lente colimador	24
3.18. Setup calibración	24
3.19. Spectral Irradiance Lamp	25
3.20. Spectral Irradiance Lamp acotado	25
3.21. Vector de calibración	26
3.22. Calibration Source DH-3P-CAL	27
3.23. Fibra Óptica VIS	27
4.1. Set-up fuente de Emisión	29
4.2. Esquema adquisición ATP 8000	29
4.3. Mediciones Eucalipto sin Calibrar	30
4.4. Mediciones Eucalipto Calibradas	30
4.5. Responsividad a diferentes niveles de Dopaje	31
4.6. PhotosensitivityNIR 512	32
4.7. Photosensitivity ATP 8000 - G11478 $-20^{\circ}C$	32
4.8. Quantum Efficiency InGaAs NIR [1]	32
4.9. Quantum Efficiency InGaAs SWIR [1]	32
4.10. Configuración Set-up óptico de mediciones	33



4.11. Configuración Set-up óptico de mediciones	34
4.12. Medición madera 1, muestra 1	35
4.13. Medición madera 1, muestra 2	35
4.14. Medición madera 1, muestra 3	36
4.15. Medición madera 1, muestra 4	36
4.16. Medición madera 2, muestra 1	37
4.17. Medición madera 2, muestra 2	37
4.18. Medición madera 2, muestra 3	38
4.19. Medición madera 2, muestra 4	38
4.20. Medición madera 1, muestra 1	39
4.21. Medición madera 1, muestra 2	39
4.22. Medición madera 1, muestra 3	40
4.23. Medición madera 1, muestra 4	40
4.24. Medición madera 2, muestra 1	41
4.25. Medición madera 2, muestra 2	41
4.26. Medición madera 2, muestra 3	42
4.27. Medición madera 2, muestra 4	42
4.28. Estimación Promedio de Madera 1 Verano.	43
4.29. Estimación Promedio de Madera 2 Verano.	43
4.30. Estimación Promedio de Madera 1 Primavera.	44
4.31. Estimación Promedio de Madera 2 Primavera.	44
4.32. Mediciones Madera 1 - Anillo Verano, Rango Visible	44



4.33. Mediciones Madera 1 - Anillo Primavera, Rango Visible	44
4.34. Mediciones Madera 2 - Anillo Verano, Rango Visible	45
4.35. Mediciones Madera 2 - Anillo Primavera, Rango Visible	45
4.36. Elementos bandas de Emisión VIS	46



1. Introducción

En el mundo que habitamos todos los cuerpos son emisores de luz y emiten su propia radiación, este fenómeno es descrito por un principio físico, correspondiente a la condición de equilibrio térmico; todo cuerpo cuya temperatura sea mayor al cero absoluto, o sea, mayor a $-273^{\circ}C$ ($0K$), emitirá radiación cual puede ser clasificada según el espectro electromagnético. El estudio de esta área se define como Radiometría, materia que relaciona la irradiancia de un cuerpo en función de su longitud de onda.

El estudio de la Radiometría en numerosos campos de aplicación ha mostrado su gran capacidad de obtener información de gran calidad para optimar procesos, caracterizar un cuerpo, prevenir fenómenos o dar explicaciones a anomalías físicas. Las investigaciones radiométricas son tan diversas abarcando áreas tales como el estudio espectrométrico de la producción de cobre [2], estimación de humedad para procesos de vegetación [3], estudios en infrarrojo de gases atmosféricos [4], etc.

Las investigaciones anteriores particularmente sobre llamas de biomásas no datan estimaciones de temperaturas, sino que han logrado caracterizar las intensidades de las concentraciones de Potasio y Sodio en el rango visible del espectro electromagnético, a modo de clasificar las especies de madera a través de su espectro. Mientras que en el NIR, se presentó la existencia de la banda de absorción proveniente del porcentaje de agua propio de la muestra de madera. [5].

La investigación tiene como objetivo principal estimar temperatura mediante la Ley de desplazamiento de Wien, utilizando los espectrofotómetros *NIR 512* y el *ATP 8000*, a modo de evaluar el desempeño de ambos. Posteriormente, se verificará la temperatura obtenida a través del método de las dos longitudes de ondas. Finalmente, se evidenciarán las bandas de emisión y absorción conocidas.

De acuerdo a nuestro conocimiento y la realización de la revisión bibliográfica, el estudio de llamas de biomásas en el SWIR no ha sido desarrollado. Por lo tanto, en esta investigación se publicará por primera vez estudios de esta materia para dicha banda.

1.1. Hipótesis de Trabajo

Las mediciones espectrales en el rango SWIR de llamas de biomasa nos permite visualizar la longitud de onda exacta donde se produce la máxima radiación de cuerpo negro para estimar temperatura mediante la ley de desplazamiento de Wien.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar desempeño de los espectrofotómetros *ATP 8000* y *NIR 512*, en mediciones de llamas de biomasa, con el fin de estimar temperatura.

1.2.2. Objetivo específico

- Estudiar y comprender los aspectos teóricos necesarios para el desarrollo de la investigación.
- Calibrar los espectrofotómetros *ATP 8000* y *NIR 512*, en unidades radiométricas ($mW/cm^2 \cdot nm$).
- Montar un set-up experimental adecuado para la adquisición de mediciones en el rango NIR-SWIR para llamas de biomasa para una especie de madera.
- Evaluar y comparar el desempeño de ambos equipos.
- Realizar el ajuste de curva de las mediciones adquiridas a través de la métrica GFC y el modelo de planck.
- Estimar temperatura a través de la ley de Wien.
- Verificar las mediciones obtenidas junto a mediciones en el rango VIS y validar el cálculo de temperatura utilizando el método de dos longitudes de ondas.
- Dar a conocer los espectros medidos e identificar las bandas de emisión y absorción presentes.



1.3. Alcances y Limitaciones

Los alcances del proyecto son:

- Calibrar y evaluar el desempeño de ambos espectrofotómetros.
- Generar de una base de datos espectrales con mediciones de espectros de llamas de biomasa.
- Estimar temperatura a través de la ley de Wien.

Las limitaciones del proyecto son:

- La calibración del espectrofotómetro ATP 8000 se realizará en el laboratorio SP&R del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Concepción.
- Las mediciones se realizarán en una Mufla del laboratorio SP&R. Por lo cual, nos veremos limitados a la obtención de la máxima señal posible en base a nuestras condiciones.

1.4. Metodología

El objetivo principal de la investigación es realizar mediciones espectrales de llamas de biomasa. Estas mediciones se realizarán en el Laboratorio SP&R del Departamento de Ingeniería Eléctrica, para ello montaremos un setup óptico en base a dos espectrofotómetros para comparar su rendimiento en la adquisición de espectro de nuestra fuente de información objetivo, en este caso, la llama de biomasa.

La metodología de trabajo viene descrita de la siguiente manera, comenzaremos estudiando los espectrofotómetros, esto es, conocer su software de funcionamiento, el ruido patrón base y sus formas de operar. Posteriormente, calibraremos los espectrofotómetros con una lámpara QTH Newport y una fuente DH-3 Plus de Ocean Insight. Luego, se dará comienzo a la elección de un setup óptico óptimo en función de la transmitancia del setup y la potencia emitida por nuestra fuente objetivo. Finalmente, una vez fijado el setup, se dará comienzo a las mediciones, la comparación del rendimiento de ambos equipos y a su posterior caracterización de espectro, realizando ajustes de curvas en base a la radiación de cuerpo negro con el fin de conocer las

bandas de absorción y emisión. Posteriormente, se estimará la temperatura mediante la Ley de Desplazamiento de Wien. Las mediciones registradas serán almacenadas en una base de datos, con el fin de caracterizar su espectro, reconocer las bandas de emisión y absorción presentes para su posterior uso ingenieril.

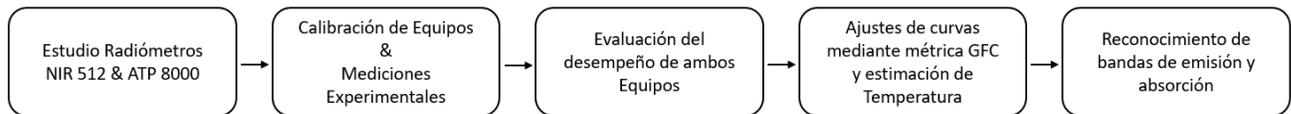


Fig. 1.1: Diagrama Metodología de Trabajo



2. Marco Teórico

A lo largo de los años se ha estudiado constantemente el comportamiento de la luz, desde su concepto de propagación como onda-partícula, hasta las aplicaciones que esta puede aportar. Considerando la propagación de la luz como partícula, describiremos su comportamiento en función de la longitud de onda (λ), clasificando su espectro a través del espectro electromagnético.

En nuestra investigación, el proceso físico tras ella, en palabras simples, opera de la siguiente forma: La radiación emitida por la combustión de biomasa viaja través del espacio y es detectada por el setup óptico, el detector mide la radiación detectada por unidad de área, en este caso, irradiancia espectral. Por alcances y limitaciones del proyecto, la banda del espectro electromagnético que estudiaremos corresponde al rango espectral entre las longitudes de onda 700[nm]-1700 [nm] y 900-2500 [nm] para ambos equipos .

Debido a la naturaleza de nuestra investigación, es imprescindible estudiar los conceptos teóricos básicos sobre calibración de espectrofotómetros y radiometría.. Posteriormente, a la obtención de la irradiancia espectral, se dará paso a la estimación de temperatura mediante la Ley de desplazamiento de Wien y el método de las 2 longitudes de onda como punto de comparación. Es por ello que a continuación se plantea una fuerte base teórica sobre los temas mencionados.

2.1. Radiometría

Corresponde a la materia que estudia la medición de transferencia de energía, en unidades de energía por tiempo o potencia, desde una fuente a un detector. Las mediciones radiométricas abarcan toda radiación electromagnética no coherente de todo el espectro electromagnético [6]. Esta admite la validez de modelos geométricos de trayectorias y la conservación de energía. Los posibles efectos de interferencia o difracciones no se consideran significativos.

2.2. Espectro Electromagnético

Se define como la representación gráfica de un conjunto de ondas electromagnéticas caracterizadas por la radiación emitida [7]. Esta representación gráfica se presenta por la siguiente figura 2.1.

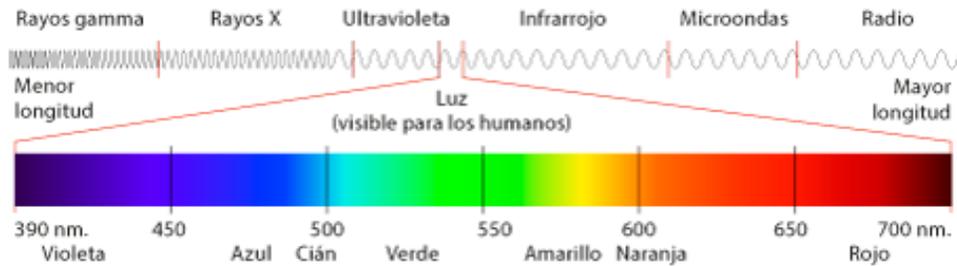


Fig. 2.1: Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético está definido por bandas de operación catalogadas por su longitud de onda de operación o por la potencia de sus ondas electromagnéticas. La banda más conocida corresponde al visible (VIS) que representa todas las ondas visibles por el ojo humano. Caso contrario a nuestra investigación, en la cual estudiaremos la banda del SWIR (sub rango del Infrarrojo) para obtener información de procesos o efectos no perceptibles para el humano.

2.3. Radiancia

Se describe como la cantidad de radiación electromagnética que es emitida por un área en particular, en comparación a la irradiancia, este término se involucra con el área de emisión de energía de la fuente de radiación [8]. Se describe por la siguiente Figura 2.2.

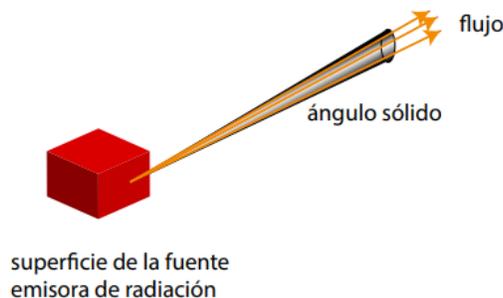


Fig. 2.2: Radiancia

2.4. Radiación de Cuerpo Negro

El termino cuerpo negro, o más bien conocido como *BB* (Black Body) [9], denota la terminología de un cuerpo ideal capaz de absorber toda la radiación incidente sobre él. Un cuerpo negro, es definido como un cuerpo capaz de absorber toda la radiación incidente del medio externo sobre él y que, en equilibrio térmico posee una nula radiación espectral. No obstante, considerando un cuerpo real la situación cambia. La energía proveniente del medio puede ser reflejada, absorbida y/o transmitida. Además, cuando un cuerpo real posee una temperatura mayor que su entorno, se enfriará a modo de llegar al equilibrio térmico, es decir, radiará energía. Este proceso es caracterizado por la emisividad del cuerpo y es definida como la razón entre la radiación térmica de un cuerpo real y la radiación térmica de cuerpo negro a una misma temperatura.

$$\varepsilon = \frac{E_{cuerpo}}{E_{BB}} \quad (2.1)$$

Con esto, se concluye que la emisividad comprende valores entre 0 y 1. A su vez, otro aspecto importante a destacar es que el *BB* poseerá mayor radiación que cualquier cuerpo real presente en la naturaleza.

Por otra parte, la energía emitida por un cuerpo negro por segundo, área emisora, ángulo sólido y por cm^{-1} , en terminos más simples, corresponde a la radiancia espectral que se emite en función de la temperatura del cuerpo negro. La expresión analítica viene dada por:

$$B(\bar{\nu}, T) = \frac{c_1 \bar{\nu}^3}{exp(\frac{c_2 \bar{\nu}}{T}) - 1} \quad (2.2)$$

De forma que, $c_1 = 1,9111 \cdot 10^{-12}$, $c_2 = 1,43883$, $\bar{\nu}$ es el número de onda y T la temperatura del cuerpo negro en unidades Kelvin (K). En terminos de radiancia, este modelo puede ser expresado en unidades $W \cdot cm^2 \cdot sr \cdot cm^{-1}$.

En la figura 2.3, se presenta la radiancia espectral de dos cuerpos negros a 0 y 100 grados [10].

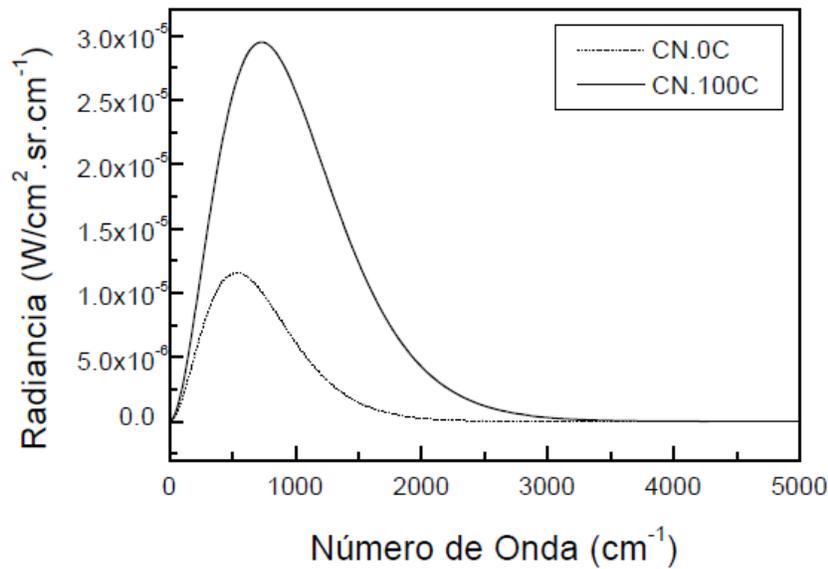


Fig. 2.3: Ley de Planck, Radiancia espectral de cuerpos negros cobre

A modo de análisis, la ley concluye dos características:

1. El cuerpo negro emite energía de forma continua en todos los números de onda
2. La energía total y espectral emitida aumenta con la temperatura

2.5. Ley de Wien

La ley establece que para cada temperatura “T”, existe una determinada longitud de onda “ λ ” donde la emisión de cuerpo negro es máxima [11]. Obteniendo la relación:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \quad (2.3)$$

De esta forma, utilizando el gráfico de Irradiancia podemos identificar el peak en intensidad para obtener λ_{max} en $[nm]$, longitud de onda que nos entrega el valor de la temperatura exacta en unidades Kelvin (K). Reemplazando la ecuación anterior, se obtiene:

$$T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{\lambda_{max}} \quad (2.4)$$

2.6. Método dos longitudes de onda

El método corresponde a una técnica para estimar temperatura de un cuerpo. La técnica se basa en suposiciones y en una radiación suave, considerando dos emisividades iguales, omitiendo bandas de emisión y absorción. Por lo tanto, no es una técnica fiable. Según la teoría, este método debe ser aplicado en el rango visible y nos encontraremos con temperaturas en el rango de 800-2000 K . El cálculo de temperatura viene dado por la siguiente relación [11].

$$T = \frac{\frac{hc}{k} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left(\frac{I_T(\lambda_1)}{I_T(\lambda_2)} \right) + 5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (2.5)$$

2.7. Teoría Espectral de la Llama

Particularmente, las llamas producidas por alguna ignición y su espectro, poseen información relevante sobre el proceso de combustión. Lo que permite que el análisis de espectros permita evaluar el estado de la combustión respecto a las diferentes especies presentes, la temperatura entre otra variables u parámetros. La energía emitida por una llama es espectralmente distribuida en emisiones continuas y discontinuas dependiendo del tipo de combustible. El espectro continuo se encuentra atribuido a una amplia banda de longitudes de onda producido por la radiación emitida por un cuerpo como resultado de su temperatura, mientras que un espectro discontinuo se encuentra confinado a una banda angosta de longitudes de onda y producido por átomos y moléculas aisladas [12].

2.8. Goodness-of-fit Coefficient (GFC)

Es una métrica de comparación en base a coeficientes basados en la desigualdad de Schwartz. Los índices de comparación se encuentran en el rango de 0 a 1, donde 1 denota una reconstrucción perfecta [9].

El parámetro de comparación se define por:

$$GFC^{(P)} = \frac{|\sum_j E_{Real}(\lambda_j)E_{Rec}(\lambda_j)|}{[\sum_j [E_{Real}(\lambda_j)]^2 \sum_j [E_{Rec}(\lambda_j)]^2]^{1/2}} \quad (2.6)$$

Donde el parámetro GFC [13], se describe como:

- **GFC >0.995:** Es necesario para un ajuste preciso.
- **GFC >0.999:** Es requerido para un buen ajuste espectral
- **GFC >0.9999:** Entrega un ajuste espectral perfecto.

2.9. Espectrofotómetro Óptico

Espectrofotómetro es el nombre que se le da a un instrumento que separa y mide los componentes espectrales de una característica física proveniente de una fuente de emisión. El instrumento es comúnmente utilizado para medir las propiedades de la luz sobre una porción específica del espectro electromagnético (definida por las limitaciones de ensamble instrumento), en donde la variable que se mide con mayor frecuencia es la intensidad de la luz spectrometer.

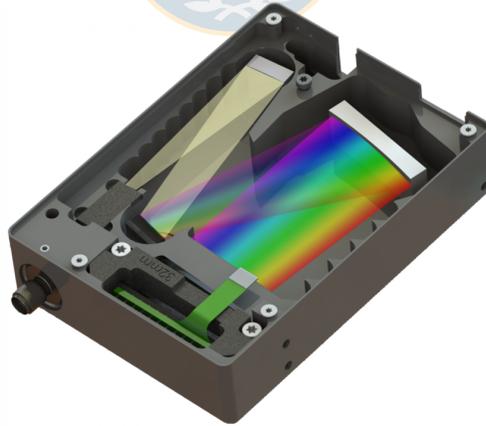


Fig. 2.4: Estructura Espectrofotómetro

El funcionamiento del Espectrofotómetro consiste de tres componentes principales, estos son, la abertura de entrada (entrance slit), la rejilla (diffraction grating) y el detector. El siguiente diagrama describe la estructura interna del equipo (Fig. 2.5).

- Entrance Slit

La luz de la fuente objetivo ingresa por la rendija de entrada y el tamaño de la rendija determina la cantidad de luz que puede medir el instrumento. El tamaño de la rendija afecta inversamente proporcional en la resolución óptica del instrumento, es decir, mientras menor sea el tamaño de la rendija, mayor será la resolución.

- Diffraction Grating

Es una rendija monocromador que se encarga de dividir la luz en varios colores, es decir, separar la luz en diferentes longitudes de ondas y a la vez en diferentes ángulos lo que permite una mejor adquisición en el posterior rebote y etapa de detección del proceso.

- Detector

El detector captura la luz del espectro y mide la intensidad de la luz en función de la longitud de onda. La información generalmente es digitalizada y visualizada a través de un gráfico del software propio del equipo. Las variaciones en el semiconductor del detector permite ampliar los rangos de visualización del equipo. Actualmente, la configuración de mejor rendimiento y más comercializada corresponde al detector de InGaAs.

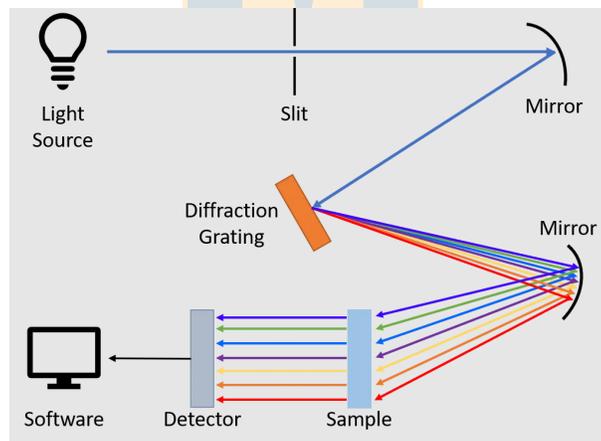


Fig. 2.5: Estructura interna Espectrofotómetro

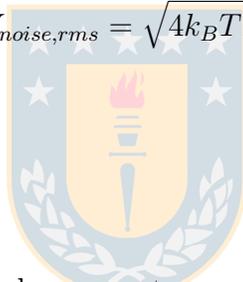
2.10. Johnson-Nyquist Noise

Es un ruido electrónico generado por agitación térmica de los electrones dentro de un conductor eléctrico en equilibrio. Este fenómeno ocurre de manera ajena a la inducción de voltaje aplicado. El ruido térmico está presente en todos los dispositivos eléctricos y electrónicos sensibles. En este caso, el espectrofotómetro estará inducido al ruido térmico, el cual puede aumentar

o disminuir dependiendo del semiconductor que se utilice como detector a diferentes niveles de dopaje [14]. A modo de complementar la información, se puede disminuir este ruido utilizando el semiconductor a temperaturas muy bajas, entre los $-20^{\circ}C$.

- $V_{noise,rms}$ es el voltage RMS del ruido.
- k_B corresponde a la constante de Boltzmann $= 1,38 \cdot 10^{-23}[JK^{-1}]$.
- T temperatura en Kelvin.
- R resistencia en Ohms $[\Omega]$.
- B corresponde al ancho de banda de la respuesta del instrumento en Hertz $[Hz]$.

$$V_{noise,rms} = \sqrt{4k_B T R B} \quad (2.7)$$



2.11. Responsividad

La responsividad es la capacidad de respuesta que mide la ganancia de entrada-salida de un sistema detector. En el caso específico de un fotodetector, la responsividad mide la salida eléctrica por entrada óptica [15]. En palabras simples, la responsividad describe la eficiencia cuántica del detector en un rango de longitudes de ondas. Por lo tanto, mientras mayor sea la responsividad mayor eficiencia tendrá nuestro detector.

- La responsividad R se expresa en unidades $[W/A]$.
- λ_0 corresponde a la longitud de onda de corte en nanómetros.
- η corresponde a la relación entre el número de electrones generados por un par electrón hueco dividido por el número de fotones incidentes.

$$R = \eta \cdot \frac{e}{h\nu} = \eta \cdot \frac{\lambda_0(\mu m)}{1,24} \quad (2.8)$$

Si el detector tiene ganancia M (genera M electrones por fotón), la relación se define de la siguiente forma:

$$R = \eta \cdot \frac{e}{h\nu} = \eta \cdot M \cdot \frac{\lambda_0(\mu m)}{1,24} \quad (2.9)$$

2.12. Generación y Recombinación

Corresponde al proceso de interacción de un dispositivo semiconductor entre sus portadores. El proceso de generación y recombinación es fundamental para describir funcionamiento y el rendimiento de estos equipos [15]. El proceso físico se describe de la siguiente manera, los pares electrón-hueco son la unidad base de generación y recombinación en semiconductores, correspondiente a un electrón en transición entre la banda de valencia y la banda de conducción donde la generación de electrones es una transición de la banda de valencia a la banda de conducción y la recombinación conduce a una transición inversa, ver Fig 2.6.

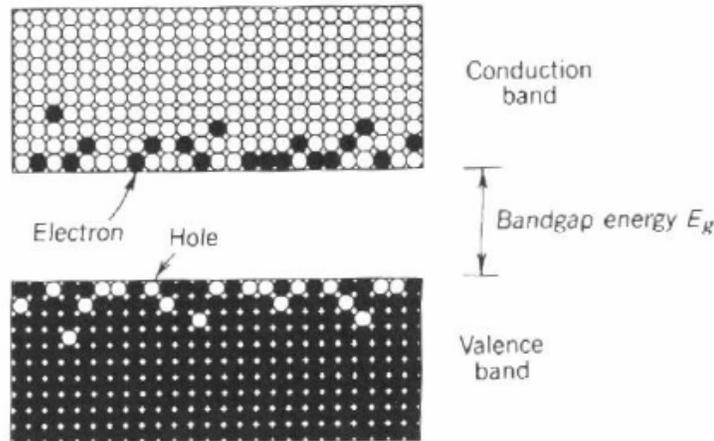


Fig. 2.6: Diagrama Interno Semicondutor

3. Desarrollo Experimental

El espectrofotómetro es el equipo fundamental de nuestra investigación, es el dispositivo encargado de realizar la adquisición del espectro de llama de biomasa. Este opera de la siguiente forma, realiza un conteo de los fotones detectados por el detector en función de la longitud de onda para luego realizar el proceso de conversión análogo-digital. Por ende, el instrumento nos entrega información en datos crudos, o sea, en cuentas digitales, sin interpretación física. Por lo tanto, para nuestro propósito es esencial calibrar el instrumentos para obtener datos radiométricos en $[W/m^2/nm]$ junto a la elección de un setup que provee una transmitancia aceptable de al menos 70 % a lo largo de su rango de operación.

A continuación, se detallan las especificaciones de los espectrofotómetros, sus estudios previos y su calibración.

3.1. Espectrofotómetros ATP-8000 v/s NIR 512

El modelo ATP-8000 de la marca *Optosky* (Fig. 3.2) es de procedencia China, las características particulares por la que hemos elegido este equipo corresponde a su rango de operación entre los 900 a 2500 $[nm]$ y a su bajo precio dentro del mercado en comparación a otras marcas tales como Ocean Optics. Por otro lado, se presenta el espectrofotómetro NIR 512 (Fig. 3.2) diseñado y elaborado por la empresa *Ocean Optics*, industria pionera en el desarrollo de equipos ópticos. Las características esenciales de este equipo son su rango de operación entre los 900 – 1700 $[nm]$, la utilización de un detector de InGaAs y su configuración de 16 bits de cuantización [16].



ATP-8000 OPTOSKY



NIR 512 Ocean Optics

Fig. 3.1: Espectrofotómetros

Las características técnicas de ambos equipo se presenta a continuación:

Sensor ATP8000	
Type	Cooled InGaAs Array CCD, Cooled down to -20°C
Spectral range	900-2600 nm
Effective pixels	256/512
Pixel size	50/25µm×500µm
Full range	~187.5 Me ⁻
Dynamic range	16666
Sensitivity	16 nV/ e ⁻
Peak value	2300 nm
Dark noise	180 µV rms
Optical parameters	
Wavelength range	900-2600nm, available in custom wavelength
Optical resolution	5-50 nm (decide on slit, spectral range)
SNR	>10000:1
Dynamic range	16666
Operating temperature	0-40 °C
Operating humidity	< 90%RH
Optical path	
Optical path	f/4 crossed C-T
Confocal distance	82.3 mm for incidence / 121.5 mm for output
Entrance slit width	5, 10, 25, 50, 100, 150, 200 µm (optional), available in custom width
Incident connector	SMA905connector, free space
Electrical parameters	
Integration time	7.8ms-256s
Output data port	USB 2.0
ADC bit depth	18 bit (output 16bit)
Power supply	5VDC±5%
Operating current	<3A
Storage temperature	-20°C to +70°C
Operating temperature	0°C to +50°C
Physical parameters	
Dimension	170×130×53 mm ³
Weight	1.5 kg

Feature	NIR512
Detector	Hamamatsu G9204-512
Number of Pixels	512
Pixel Size	25 x 500µm
Responsivity Range	0.85 – 1.7µm
Responsivity Peak	1.6µm
Dynamic Range	5000:1
Signal to Noise	4000:1
Dark Signal RMS ¹	<12 counts
Defective Pixels ²	None Max Dark Current = 60pA @ 20°C
Operating Temperature	-5°C
Above Zero Integration Time ³	1000ms

Fig. 3.2: Parámetros espectrofotómetros

Notamos que ambos equipos poseen un detector formado por el semiconductor *InGaAs*, el uso de 512 pixels y rango dinámico máximo de 65,000 (*cuentas*). Mientras que sus diferencias principales son el rango de operación, el ATP-8000 posee mayor rango de operación y debe encontrarse estable en -20 °C, en cambio, el NIR 512 opera dentro del rango de operación del 512 y necesita una temperatura estable de -5 °C. Adicionalmente, otra característica fundamental corresponde a la recomendación de utilizar un tiempo de integración de 24[ms] y al uso de exclusivo de una rendija de 25[µm] como mínimo.

Para más información, el datasheet se encuentra en el siguiente enlace [17]

3.1.1. Estudio de ambos Espectrofotómetros

En este punto, detallaremos los estudios prácticos de ambos instrumentos utilizando las configuraciones recomendadas que presentó el fabricante, es decir, utilizar los tiempos de integración recomendados, mantener la temperatura de operación del equipo, etc. Comenzamos estudiando el ruido propio del equipo, más bien llamado **Dark Noise Signal**, ruido que corresponde al ruido natural del equipo en un estado de reposo, donde no existe incursión de luz. A modo de ejemplificar esta característica, se presentan las siguientes mediciones:

- Espectrofotómetro NIR 512 Espectrofotómetro ATP-8000

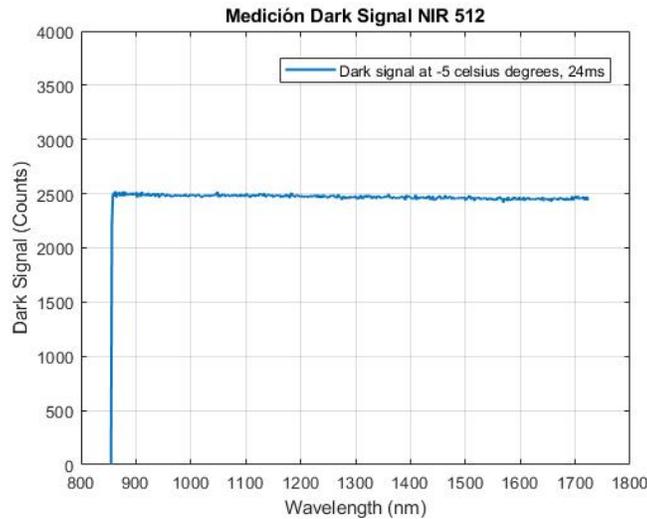


Fig. 3.3: Dark noise signal NIR 512 Ocean Optics

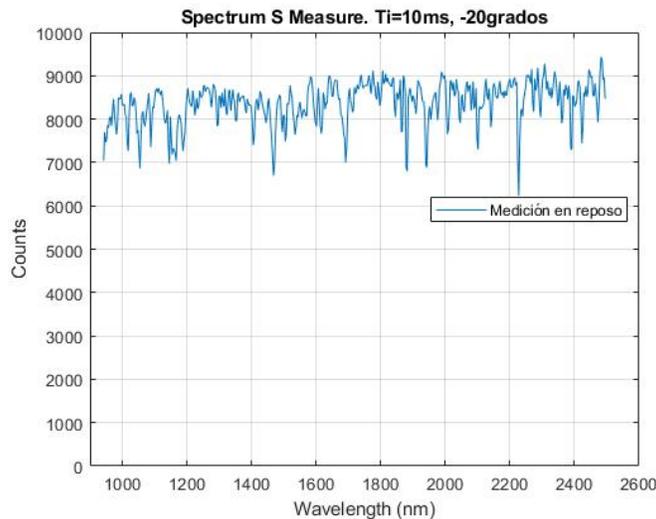


Fig. 3.4: Dark noise signal ATP 8000 Optosky

En las mediciones anteriores podemos notar una gran diferencia en el ruido base del equipo, donde el dark noise signal del equipo ATP es más elevado y presenta un patrón bastante ruidoso en comparación del ruido que presenta el NIR 512. Por lo tanto, estudiaremos de manera particular el ruido del equipo de Optosky para solucionar este problema, ya que el NIR 512 presenta un buen rendimiento en un principio. Utilizaremos una función propia del programa: **Dark Spectrum Deducted**. Esta función presenta un algoritmo que elimina un poco el gran offset propio del instrumento. Se presenta una medición del mismo tipo que figura 3.6 pero ahora con esta función activa.

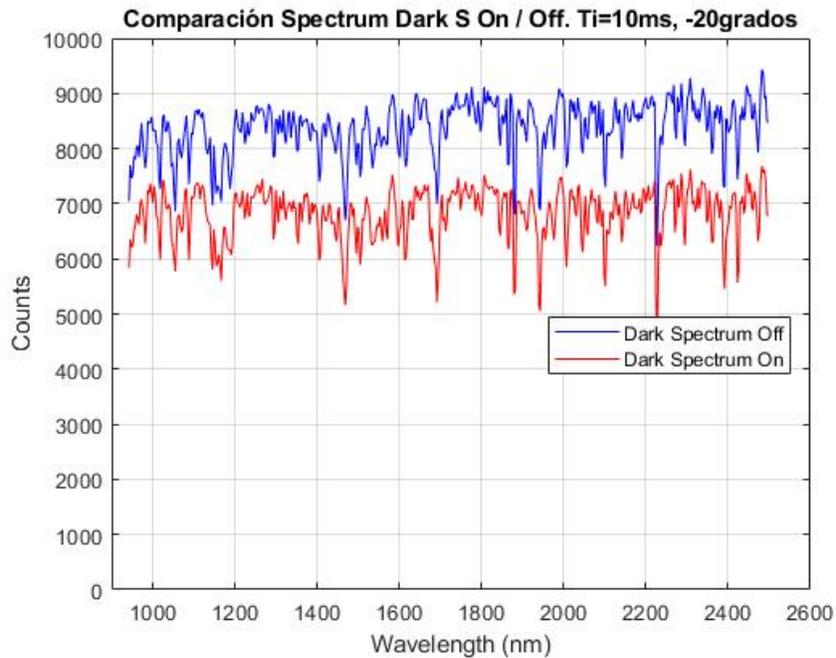


Fig. 3.5: Comparación Spectrum Dark Deducted OFF v/s ON

Notamos que la curva roja correspondiente a la medición con la función de reducción de offset activa disminuyó en intensidad en comparación a la curva azul, cual posee esta característica desactivada. Esta función es de gran ayuda, ya que disminuye el offset de la señal y por ende nos otorgará mediciones más exactas a futuro. Por lo tanto, en todas las mediciones de ahora en adelante, serán utilizando esta función activa del programa.

- Comportamiento del patrón de ruido

A continuación, se caracteriza el ruido presente en las mediciones en función del incremento del tiempo de uso del instrumento.

Presentamos la siguiente experimentación: Realizamos 5 mediciones en intervalos de 10 minutos:

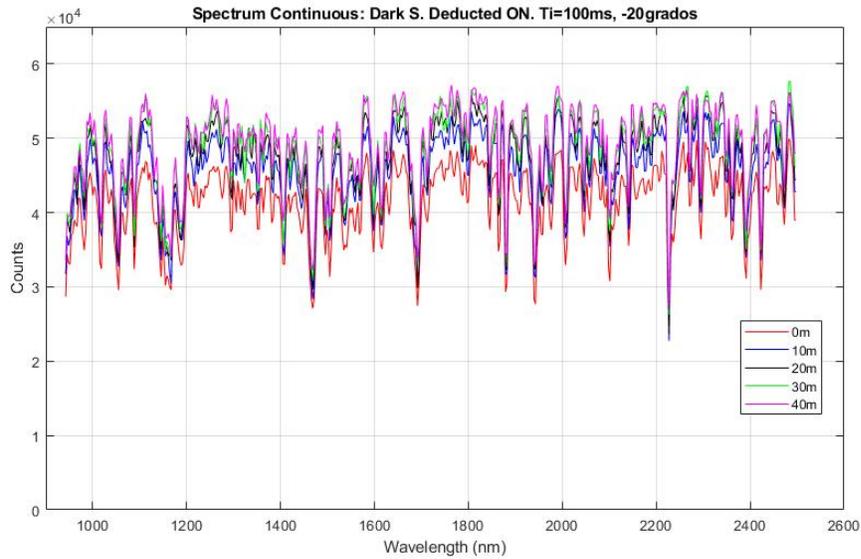


Fig. 3.6: Ruido Medición sin Calibrar, $T_i = 100[\text{ms}]$

De la figura anterior, notamos claramente que en estas 5 mediciones, el instrumento no presentó un ruido aleatorio gaussiano, sino que presenta un comportamiento constante. Lo cual es positivo para nuestra investigación, ya que este patrón al ser constante puede ser eliminado. Por otra parte, también se logra notar una alza en las intensidades de las mediciones a medida que aumenta el tiempo de uso del instrumento. Para evidenciar este comportamiento, realizamos un zoom en la gráfica y nos apoyamos del calculo del área bajo la curva de las señales para poder caracterizar este comportamiento.

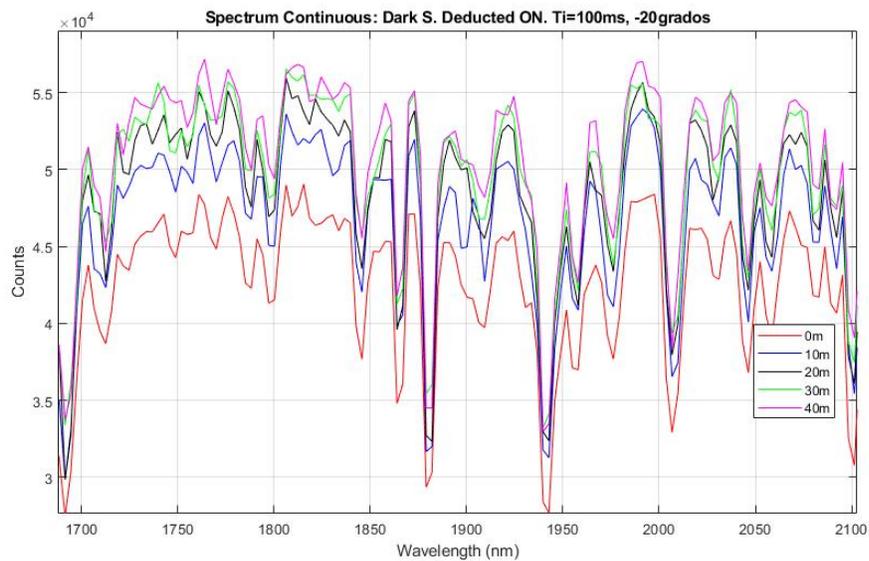


Fig. 3.7: Zoom: Ruido Medición sin Calibrar

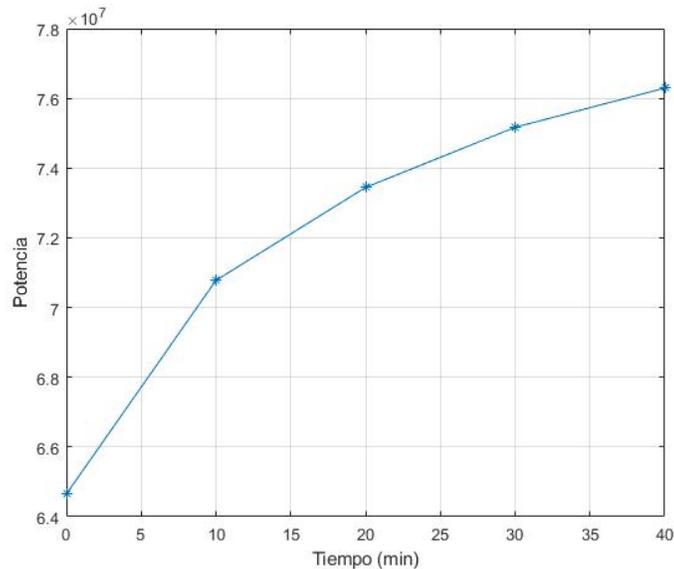


Fig. 3.8: Crecimiento del ruido (en área) a través del tiempo de tiempo

Notamos que el ruido aumenta a medida que aumentamos el tiempo de uso del instrumento. La curva de crecimiento presenta un comportamiento suave y comienza a estabilizarse luego de los 40 minutos. Si bien, las diferencias no son tan significativas por el orden de magnitud trabajado. Se utilizará el instrumento luego de 40 minutos encendidos para ser más precisos en las mediciones.

- Temperatura del sensor del instrumento

El instrumento también presenta un software para visualizar el comportamiento de la temperatura/intensidad de luz del sensor en función del tiempo transcurrido de operación. Este patrón debe ser estable para no aumentar el ruido del instrumento. Es por ello, que mientras realizamos las mediciones anteriores, se monitoreó esta característica. Obteniendo resultados los siguientes resultados:

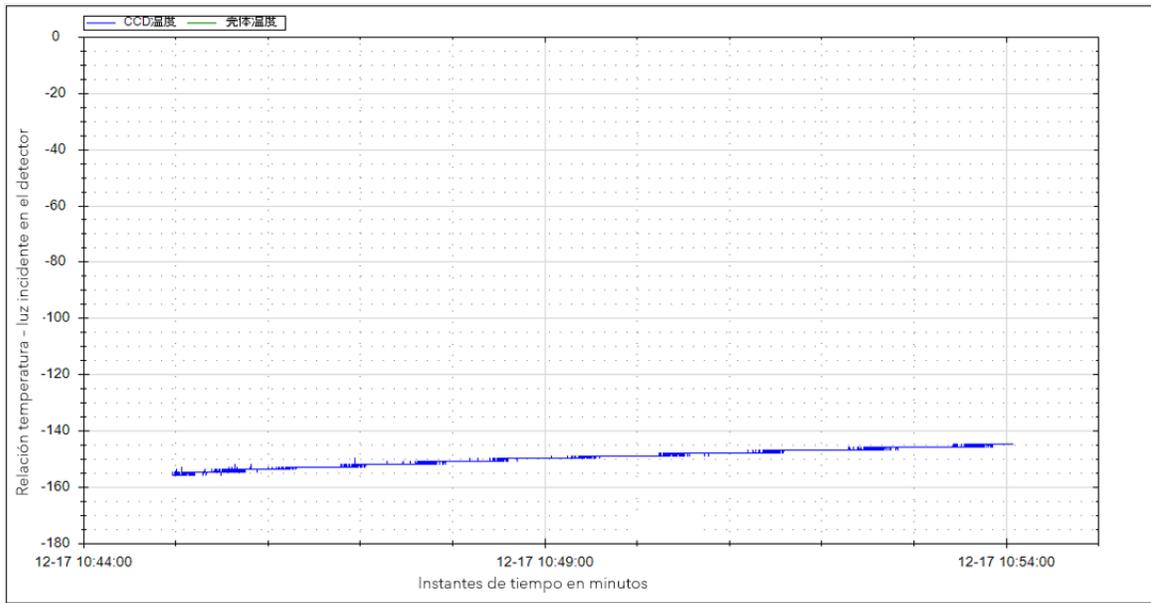


Fig. 3.9: Crecimiento relación temperatura/luz 10minutos

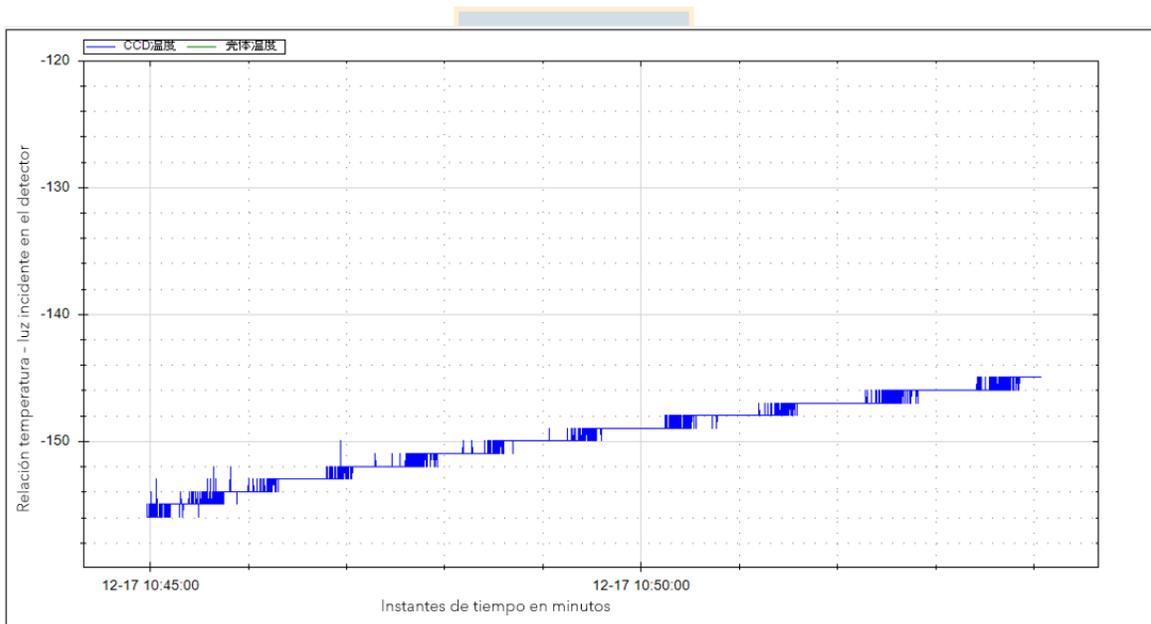


Fig. 3.10: Crecimiento relación temperatura/luz 20minutos

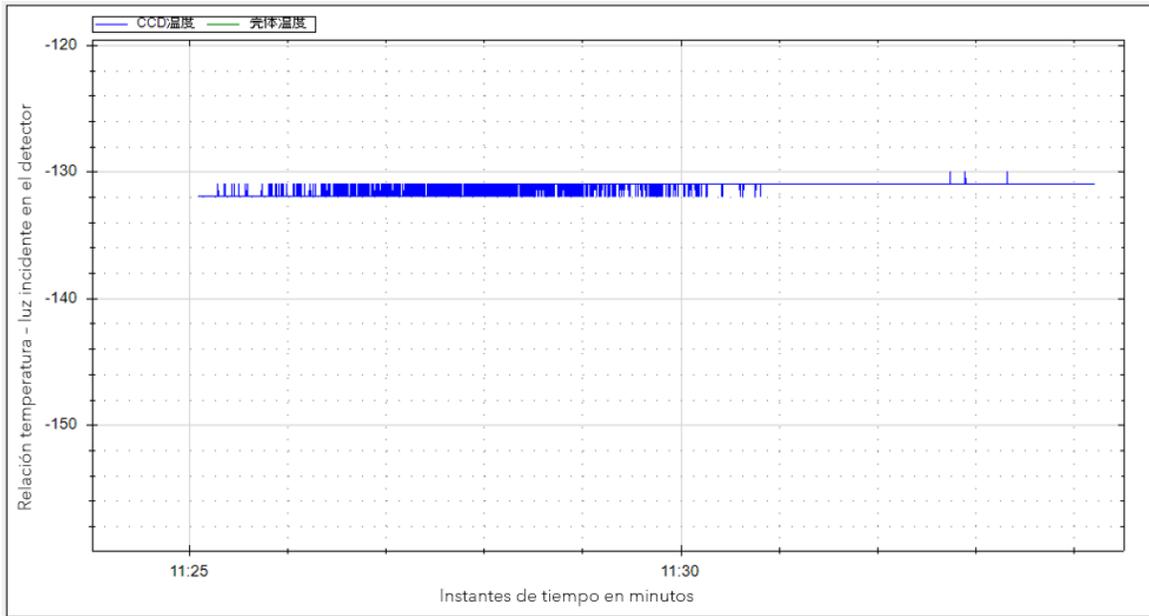


Fig. 3.11: Crecimiento relación temperatura/luz 30 minutos

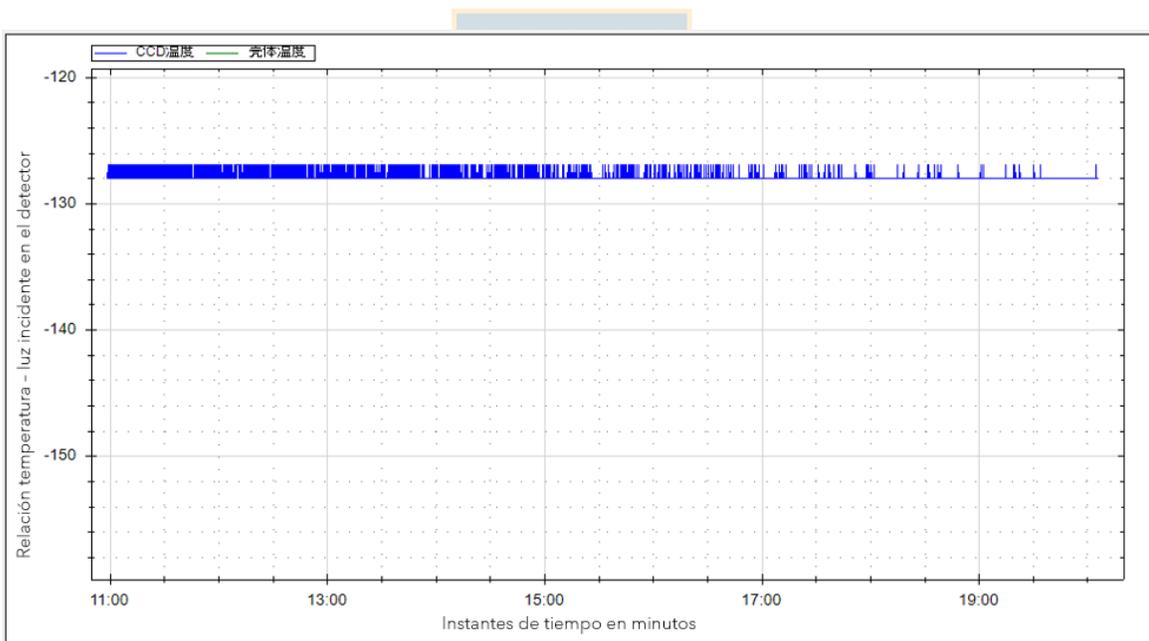


Fig. 3.12: Crecimiento relación temperatura/luz 40 minutos

De la monitorización, se concluye que la relación temperatura/intensidad de luz, se mantiene estable luego de 40 minutos de uso.

Según la revisión bibliográfica, estudios anteriores en las banda NIR, recomiendan un tiempo de integración de 10ms para poder visualizar una mejor señal. Es por ello que se configuró este valor, de igual forma, la temperatura del sensor seteada a -20 grados, nos otorga una mayor sensibilidad para las mediciones.

Por lo tanto, los parámetros básicos a configurar en el instrumento, vienen dado por las siguientes características.

- Dark Spectrum Deducted ON.
- Temperatura de trabajo del sensor a -20 grados.
- Tiempo de integración 10 ms.
- Instrumento en reposo 40 minutos.

Ya concluidos estos parámetros, damos comienzo a la calibración en unidades radiométricas de los instrumento.

3.1.2. Calibración Radiométrica ATP-8000

Dado que el método para medir temperatura en esta investigación se deduce de la ley de cuerpo negro de Planck, necesitamos calibrar el instrumento para corregir el espectro medido y obtener este espectro en unidades radiométricas, es decir, en Irradiancia ($\mu W/cm^2/nm$). Además, el corregir el espectro trata sobre anular valores erróneos producidos por la fibra óptica y el espectrofotómetro, ambos no son elementos ideales y por ello su sensibilidad espectral cambia para distintas longitudes de onda.

Para lograr una calibración correcta utilizaremos una lámpara de calibración con distribución de radiación conocida (Fig. 3.16). Precisamente, se utilizó la lámpara de calibración 63350 - 1000W QTH Source Lamp (Fig 3.14) y la fuente de poder 69931 Digital Radiometric Power Supply (Fig 3.15), ambos de la empresa Newport.

La calibración consiste en obtener los coeficientes de calibración, valores que representan las correcciones para el espectro en unidad de cuentas. La matemática necesaria para realizar la calibración viene descrita por:

$$E(\lambda)_{counts} = H(\lambda) \cdot E(\lambda)_{real} + \rho \quad (3.1)$$

- $E(\lambda)_{counts}$: Espectro adquirido por el espectrofotómetro sin calibrar a una fuente emisora.
- $H(\lambda)$: Función de transferencia del espectrofotómetro.
- $E(\lambda)_{real}$: Espectro conocido de una fuente de calibración.

- ρ : Ruido natural del camino óptico.

Desglosando la ecuación, la función de transferencia del espectrofotómetro $H(\lambda)$ es la encargada de realizar la conversión del espectro real al que se cuenta emitiendo la fuente óptica en un espectro en cuentas digitales. Por lo tanto, podemos decir que $H(\lambda)^{-1}$, será el vector de calibración del instrumento.

$$H(\lambda) = \frac{(\lambda)_{counts} - \rho}{E(\lambda)_{real}} \quad (3.2)$$

Considerando que el ruido es despreciable al ser de caracter aleatorio. Se reescribe la ecuación en función del vector de calibración:

$$Vec_{cal} = \frac{E(\lambda)_{counts}}{E(\lambda)_{real}} \quad (3.3)$$

Se da inicio a la obtención del vector de calibración Vec_{cal} .

- Setup

Se presentan los equipos utilizados



Fig. 3.13: ATP-8000 Spectrometer Optosky



Fig. 3.14: 63350 - 1000W QTH Source Lamp



Fig. 3.15: 69931 Digital Radiometric Power Supply.

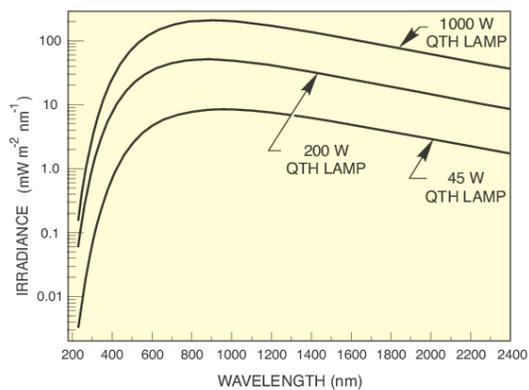


Fig. 3.16: Espectro de irradiancia Fuente de Calibración



Fig. 3.17: Lente colimador

El setup práctico esta descrito por la Figura 3.18



Fig. 3.18: Setup calibración

La calibración fue realizado con el equipo puesto en una mesa óptica a 50 [cm] de la fuente de luz y a una altura de 15[cm]. La potencia de la fuente fue de 900W, un tiempo de integración de 10ms, scan interval de 10ms y un promedio de 3 mediciones. Además, de considerar los parámetros utilizados anteriormente.

- Obtención Vector Calibración

En primer lugar, el espectro de la irradiancia calibrada conocida (Fig. 3.19, tuvo que ser acotada (Fig. 3.20) a nuestro rango espectral aproximado entre 900 – 2500[*nm*], dato que corresponde al termino $E(\lambda)_{real}$.



Fig. 3.19: Spectral Irradiance Lamp

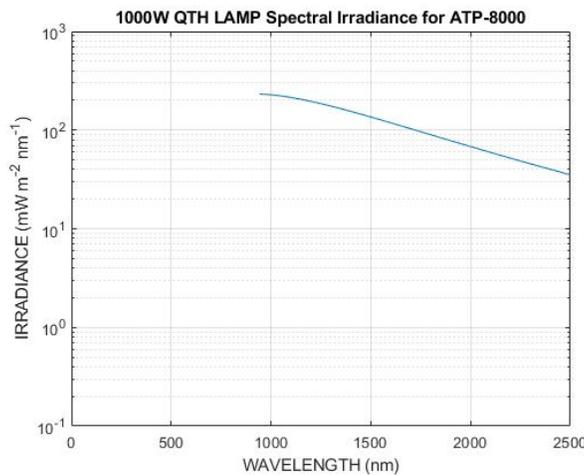


Fig. 3.20: Spectral Irradiance Lamp acotado

Por otra parte, $E(\lambda)_{counts}$ corresponde a una medición real sin calibrar de la fuente de emisión. Donde se utilizó la fuente de poder mencionada a una potencia de 1000[W]

utilizando la configuración de parámetros ópticos del equipo ya establecidos anteriormente. De esta manera concluimos la obtención del vector de calibración, dado por Fig. 3.21

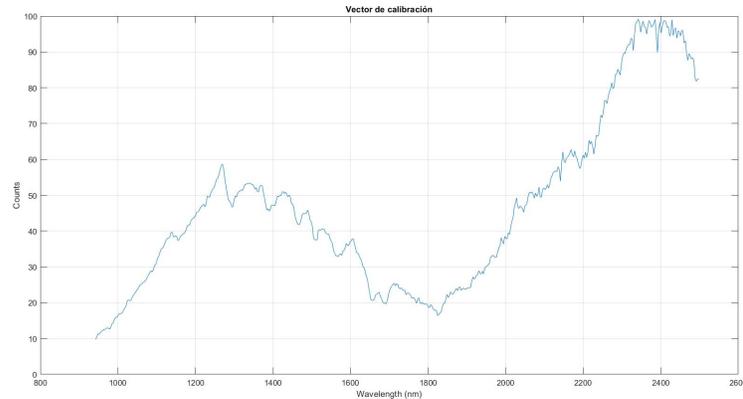


Fig. 3.21: Vector de calibración

- Resultados Calibrados

Finalmente, las mediciones calibradas vendrán dadas por Ecuación 3.4:

$$Irr_{Calibrada} = \frac{E_{counts}}{Vec_{cal}} \left[\frac{\mu W}{cm^2 \cdot nm} \right] \quad (3.4)$$

Donde los parámetros corresponden a:

- E_{counts} : Espectro adquirido sin calibrar de una medición real de llamas de biomasa.
- Vec_{cal} : Vector de calibración obtenido previamente.

3.1.3. Calibración NIR 512

Analogamente al equipo anterior, el NIR 512 también necesita ser calibrado en unidades radiométricas. Para ello, utilizaremos los siguientes equipos y accesorios, la lámpara de calibración DH-3 Plus (Fig 3.22) con rango de operación de 210 – 1100 [nm] extendible hasta los 2400 [nm] con una fuente de DTH (Deuterium Tungsten Halogen) [18], fibra óptica de rango NIR (Fig 3.23) y un lente colimador (Fig. 3.17) de mismas características usado en el setup del ATP 8000.



Fig. 3.22: Calibration Source DH-3P-CAL



Fig. 3.23: Fibra Óptica VIS

La calibración es elaborada por el software del equipo, cual se opera a través de un PC y se dan los parámetros solicitados, como la emisión de la fuente de calibración, el espectro calibrado de la fuente y el diámetro de la fibra. El programa obtiene el vector de calibración y aplica esta transformación en tiempo real. A modo de guía utilizaremos los apuntes del alumno de magíster Fernando Castillo [19] para explicar el proceso que realiza el software.

$$V_{ecal} = \frac{I_P \cdot (T \cdot A \cdot dL_P)}{S_P - D_P} \quad (3.5)$$

Donde:

- I_P : Archivo de calibración, espectro de referencia.
- T : Tiempo de integración medido en segundos.
- A : Área de colección medida en cm^2 .
- dL_P : Extensión de longitud de onda medido en nanómetros.
- S_P : Espectro emitido por una fuente óptica en cuentas.
- D_P : Espectro oscuro (*Dark*) medido en cuentas.

4. Adquisición y Procesamiento de Datos

El siguiente capítulo narra los acontecimientos realizados para la adquisición de señal experimental para evaluar el rendimiento de los equipos y posterior a ello, la adquisición de espectro proveniente de una llama de biomasa de la especie pino radiata con el instrumento que presentó mejor rendimiento, todo el proceso fue realizado en el Laboratorio *SP&R* del Departamento de Ingeniería Eléctrica.

4.1. Experiencia Espectrofotómetros

Ambos equipos en su etapa de calibración presentaron buenos resultados, llegando a saturarse por la fuente de calibración fijada. Sin embargo, en las primeras mediciones a llamas adquiridas por el espectrofotómetro ATP 8000, notamos que el equipo adquiría baja señal y una alta sensibilidad al ruido provocado por la temperatura. Durante el transcurso de la investigación se utilizaron diferentes fuentes de emisión de combustión de biomosas, configuraciones dadas por dimensiones uniformes de madera de $1x1x1[cm]$ dentro de un horno mufla a pequeñas fogatas aisladas, sin embargo, en todas las comparaciones el equipo NIR 512 presentó mejor rendimiento, mayor adquisición de señal y menor sensibilidad al ruido. A modo de presentar resultados en base a este equipo, se expone la configuración que presentó mayor señal obtenida. Finalmente, como el equipo NIR 512 presentó un mejor rendimiento, la toma de mediciones fue efectuada por este dispositivo.

4.1.1. Medición experimental ATP 8000

Se encendió una estufa de hogar con 4 astillas de eucalipto (Figura 4.1), la combustión generó una alta llama y la temperatura radiada era bastante potente. Las mediciones fueron realizadas en procesos cortos, ya que no es recomendable dejar que el espectrofotómetro este expuesto a altas temperaturas durante tiempos prolongados. Por lo que constantemente se estuvo midiendo el *dark spectrum* para evitar una alza de intensidades debido al ruido provocado

por la temperatura. El esquema utilizado para la adquisición de espectros viene dado por Figura 4.2.



Fig. 4.1: Set-up fuente de Emisión

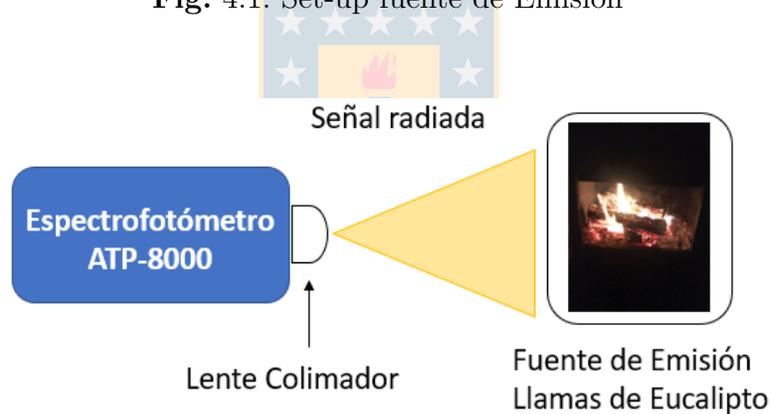


Fig. 4.2: Esquema adquisición ATP 8000

Las mediciones realizadas respetan las configuraciones establecidas anteriormente. Se realizaron 5 mediciones de espectros, representados por Figura 4.4. Donde las diversas curvas que se logran apreciar corresponden a los diferentes niveles de intensidad de la llama provocado principalmente por su propio dinamismo.

Posteriormente, se calibraron las mediciones (Ec. 3.4) utilizando el software *MatLab*. Obteniendo los siguientes espectros calibrados.

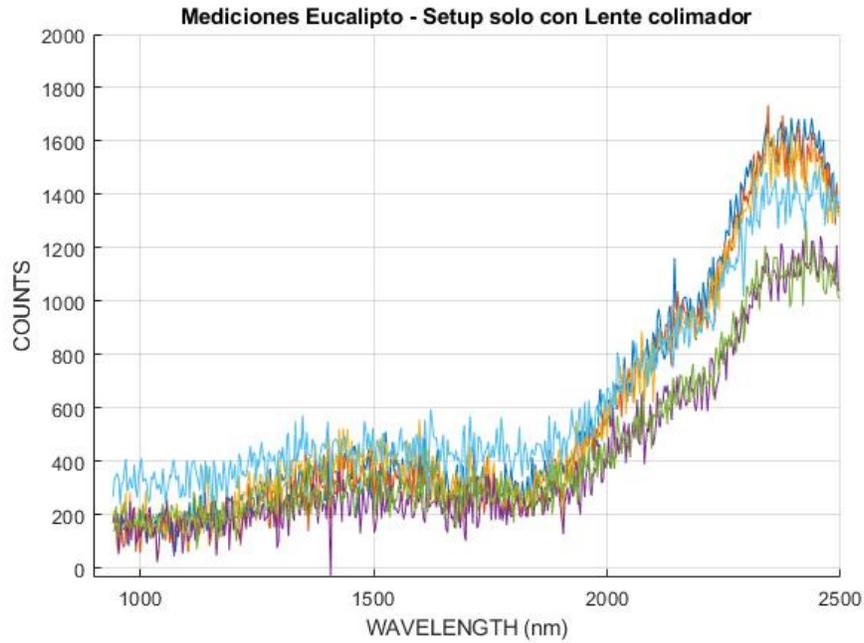


Fig. 4.3: Mediciones Eucalipto sin Calibrar

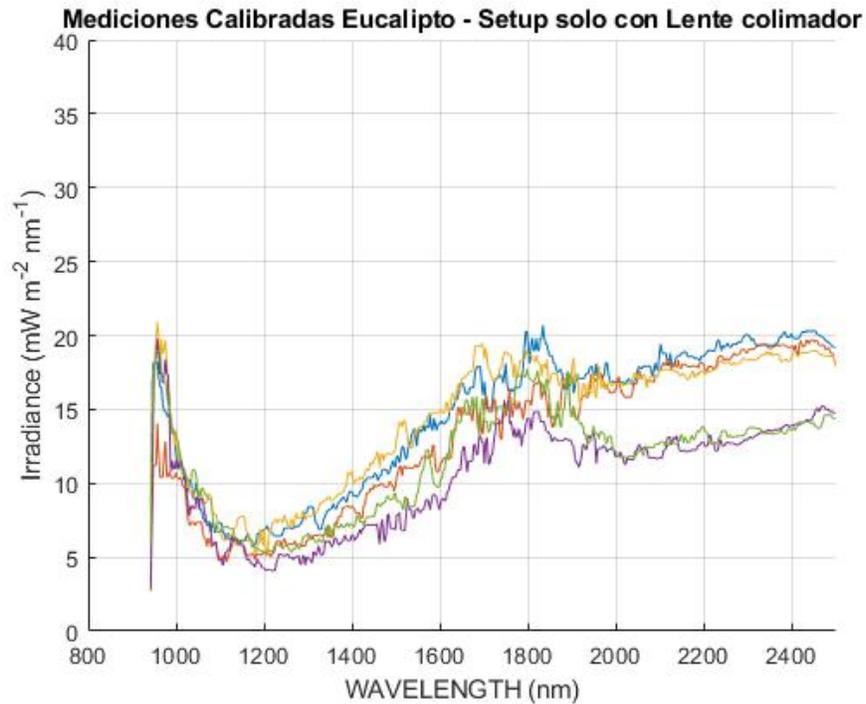


Fig. 4.4: Mediciones Eucalipto Calibradas

Como podemos notar las intensidades de las mediciones son bastantes bajas y además notamos una señal bastante ruidosa producto del bajo SNR que presentó el equipo. Es por ello que las mediciones finales fueron realizadas por el equipo NIR 512.

4.2. Explicación física ruido ATP 8000

En el ítem anterior, adquisición experimental, se determinó que el instrumento ATP 8000 adquiriría una baja señal y además presentaba una alta sensibilidad al ruido. A modo de complementar esta investigación y desglosar este comportamiento del equipo, nos preguntamos, ¿A qué se debe esta características si ambos equipos poseen un detector de InGaAs? Si bien, ambos equipos comparten el mismo semiconductor, los dos equipos trabajan en diferente rango espectral (Ver Fig. 4.5), donde la variación los de niveles de dopaje del semiconductor regula el rango de operación del equipo y además, podemos notar que a mayor rango de operación menor será la responsividad del equipo (Fig 4.8 y 4.9).

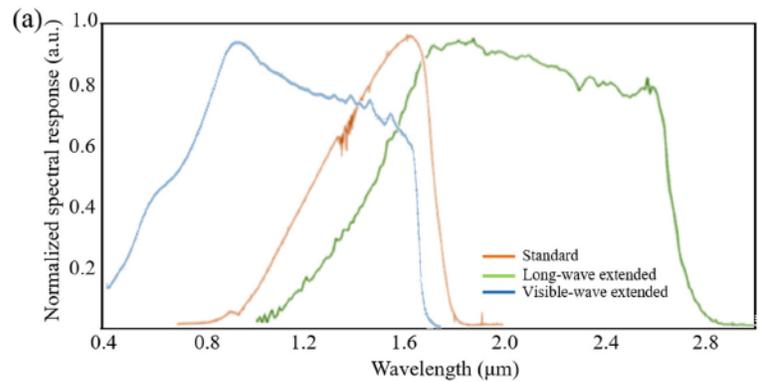


Fig. 4.5: Responsividad a diferentes niveles de Dopaje

Por otra parte, desde el punto de vista físico de dispositivos semiconductores y sensores ópticos, la variación del dopaje del detector para una configuración que posea rango espectral hasta los 900-2500[nm] (InGaAs-long) necesitara menor energía en comparación al dopaje del rango 700–1700[nm] (InGaAs - standing) para realizar el proceso de generación y recombinación. En resumen, podemos afirmar que el detector poseera mayor *Photosensitivity* y por lo tanto, necesitará menor energía gap, ya que esta relación es inversamente proporcional.

Se adjuntan las respuestas espectrales del Detector de InGaAs.

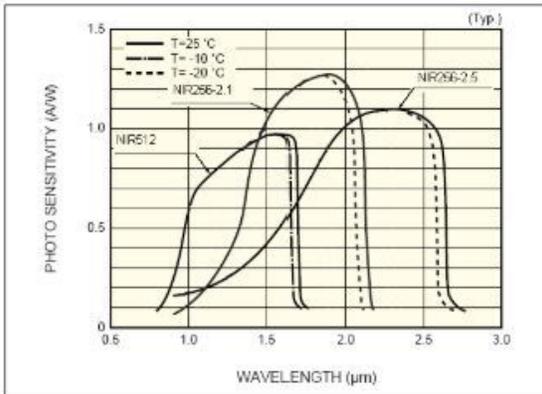


Fig. 4.6: Photosensitivity NIR 512

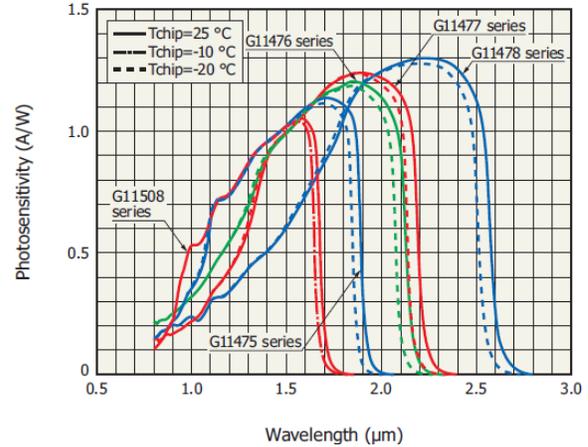


Fig. 4.7: Photosensitivity ATP 8000 - G11478 $-20^{\circ}C$

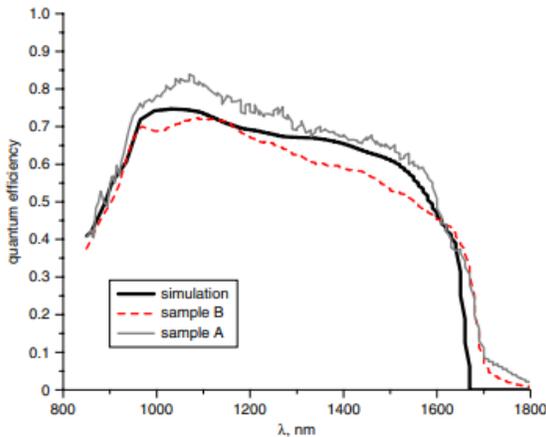


Fig. 4.8: Quantum Efficiency InGaAs NIR [1]

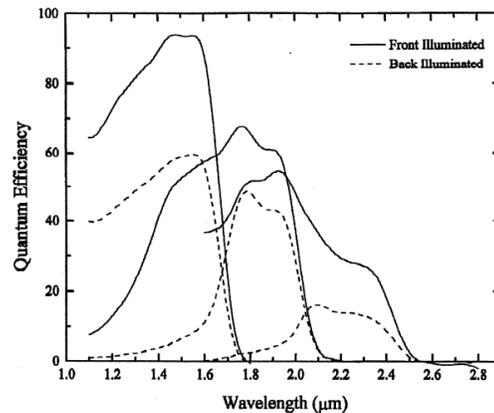


Fig. 4.9: Quantum Efficiency InGaAs SWIR [1]

Finalmente, esta característica en particular vuelve al instrumento más sensible al ruido térmico, fenómeno llamado Johnson Nyquist Noise, para reducir el ruido, se enfria el arreglo de fotodetectores pero como el instrumento se encuentra trabajando a temperatura de $-20^{\circ}C$, cual es su temperatura óptima de operación, concluimos que para reducir el fenómeno del ruido térmico y aumentar la señal de adquisición, lo más óptimo es cambiar la rendija de apertura (Entrance Slit) a una de mayor tamaño, guiándonos por el instrumento NIR 512, aconsejamos el cambio a una rendija de apertura de $25[\mu m]$.

4.3. Set-up Óptico Mediciones Finales

El set-up se encuentra principalmente formado por una Mufla, cual es un horno eléctrico de temperatura controlable. La temperatura de la mufla se configuró a $700^{\circ}C$, ya que la teoría base de estos experimento recomienda trabajar en este rango. Es importante mencionar que la mufla posee un ladrillo reflectario, material que protege nuestro entorno y aísla la toma de mediciones, no obstante, la señal promovida por este material genera perturbaciones en las mediciones, es por ello, que será utilizado como ruido base. Las muestras de madera a investigar pertenecen a cortes uniformes de dimensiones $1x1x1[cm]$ de la especie pino radiata, las muestras fueron puestas sobre un vaso de crisol (que no posee reflectancia) para obtener una mejor adquisición. Finalmente, es importante mencionar que dichos cortes provienen de las secciones de primavera y verano del anillo seleccionado a una altura $8[m]$ de la base del tronco, debido a ello, diferenciaremos los cortes según el anillo que pertenezca.

El set-up óptico se encuentra definido por el siguiente esquema:



Fig. 4.10: Configuración Set-up óptico de mediciones

Las mediciones fueron obtenidas de forma simultánea por nuestros dispositivos NIR512 y HR4000 que operan en los rangos nir y vis respectivamente.

Los ajustes técnicos de los equipos presentan las mismas configuraciones y parámetros del

espectrofotómetro ATP-8000, es decir:

- Tiempo de integración 10ms.
- Average Scanning times con un valor de 10.
- Distancia apropiada de 1[m]

4.3.1. Mediciones NIR 512

Las mediciones fueron obtenidas para muestras proveniente de un corte de madera a una altura de 8[m] desde la superficie de un tronco de pino radiata. La distancia radial fue de 50[mm], correspondiente a la longitud desde el exterior del tronco hacia su centro. Según esta característica las muestras fueron clasificadas como pertenecientes a la zona de anillo primavera o verano. En el siguiente esquema se describe esta característica. (Fig. 4.11).

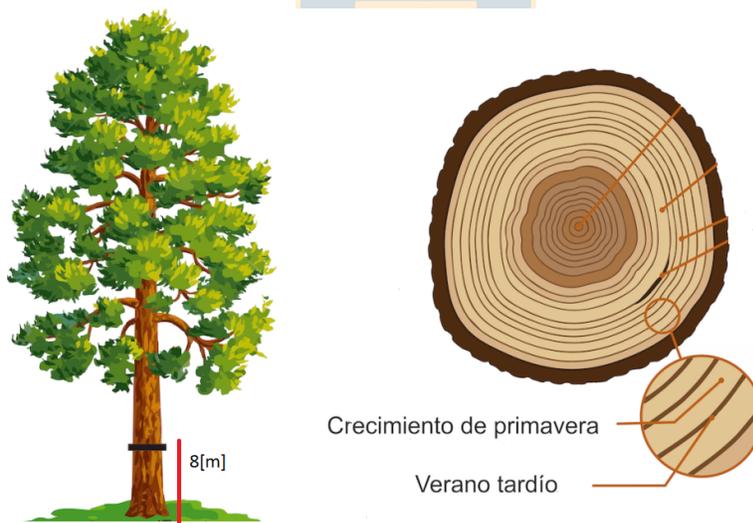


Fig. 4.11: Configuración Set-up óptico de mediciones

A modo de obtener mayor información y comparar mediciones, se utilizaron 2 troncos de maderas y de ellos se obtuvieron 4 muestras, dichas muestras varían dependiendo de la sección de anillo/primavera de donde se obtuvieron. Las mediciones se presentan a continuación:

Madera 1 - Pino Radiata, Anillo Verano

- Muestra 1, anillo verano:

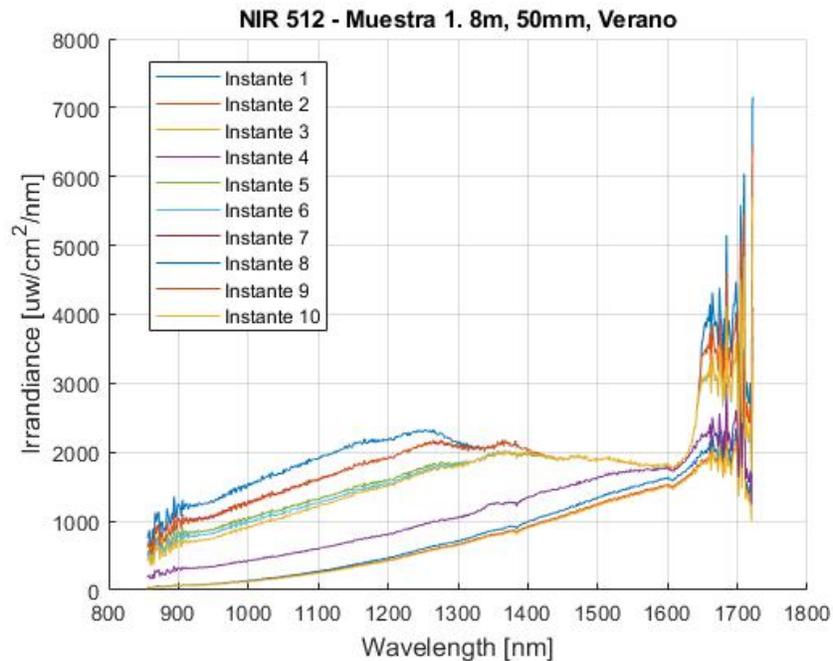


Fig. 4.12: Medición madera 1, muestra 1

- Muestra 2, anillo verano:

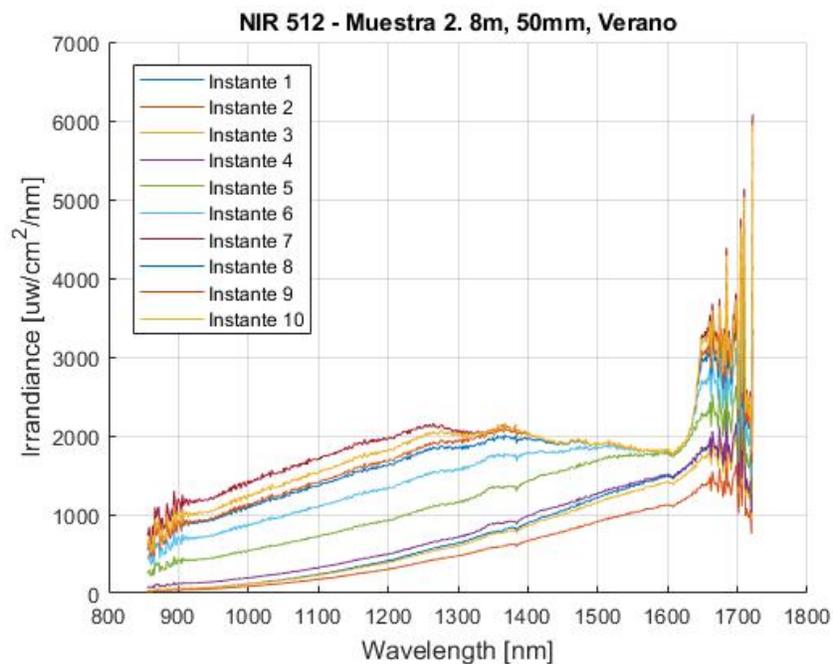


Fig. 4.13: Medición madera 1, muestra 2

- Muestra 3, anillo verano:

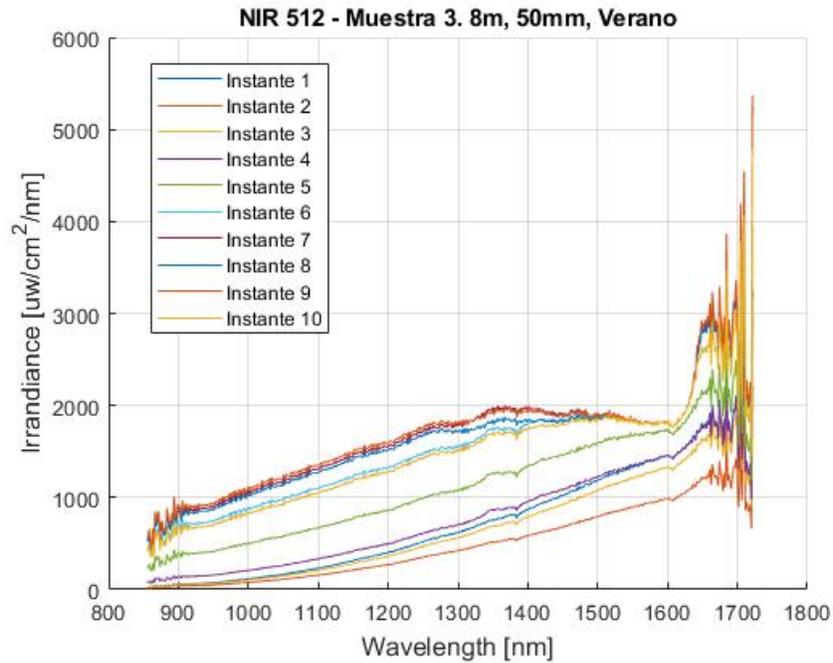


Fig. 4.14: Medición madera 1, muestra 3



- Muestra 4, anillo verano:

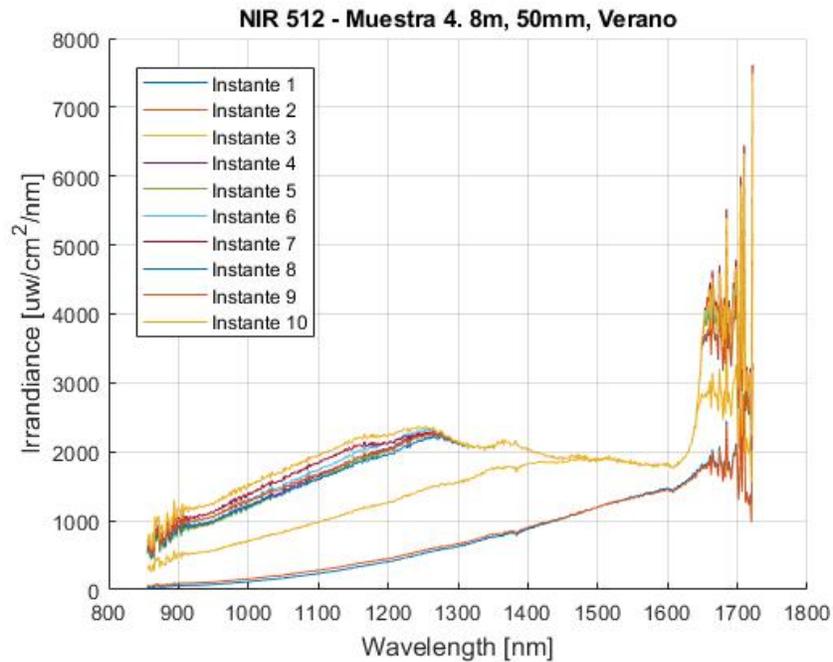


Fig. 4.15: Medición madera 1, muestra 4

Madera 2 - Pino Radiata, Anillo Verano

- Muestra 1, anillo verano:

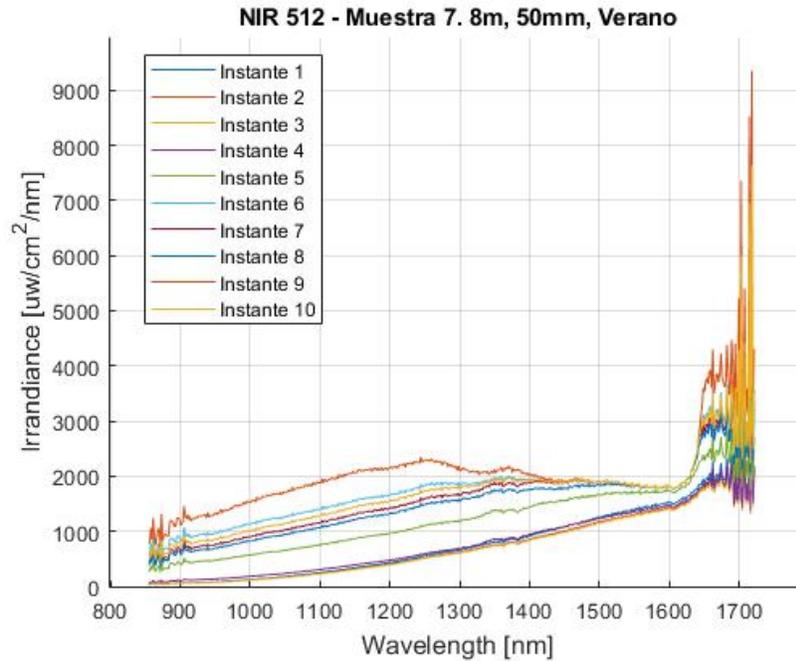


Fig. 4.16: Medición madera 2, muestra 1

- Muestra 2, anillo verano:

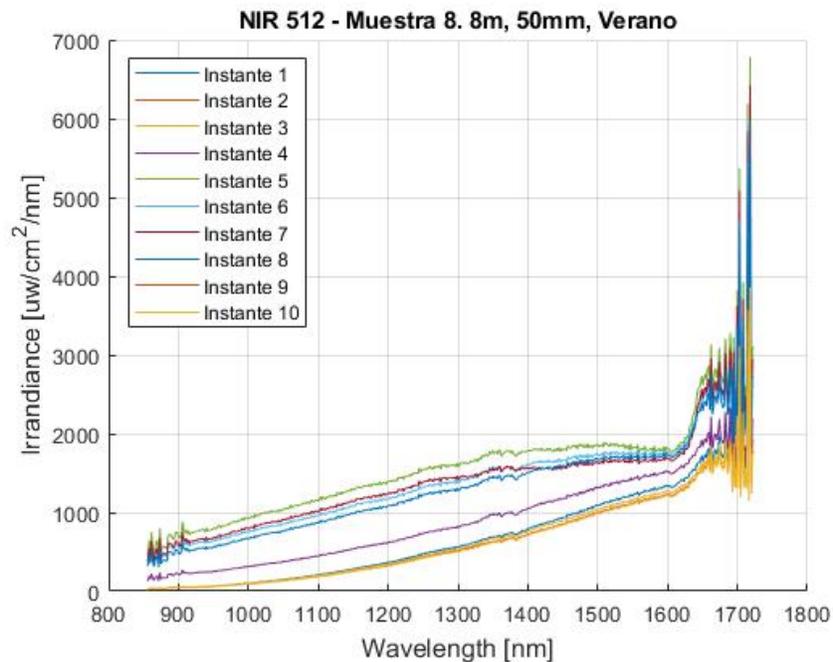


Fig. 4.17: Medición madera 2, muestra 2

- Muestra 3, anillo verano:

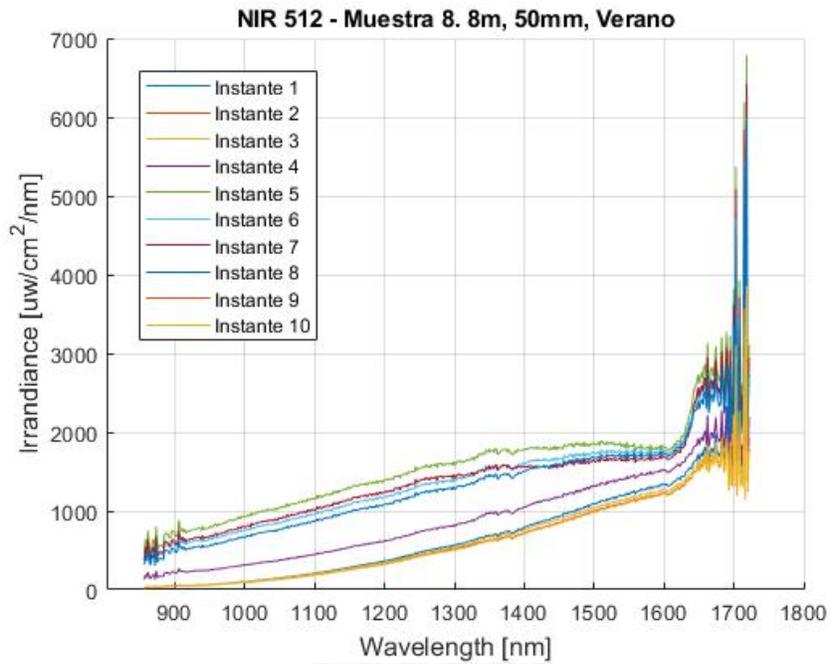


Fig. 4.18: Medición madera 2, muestra 3



- Muestra 4, anillo verano:

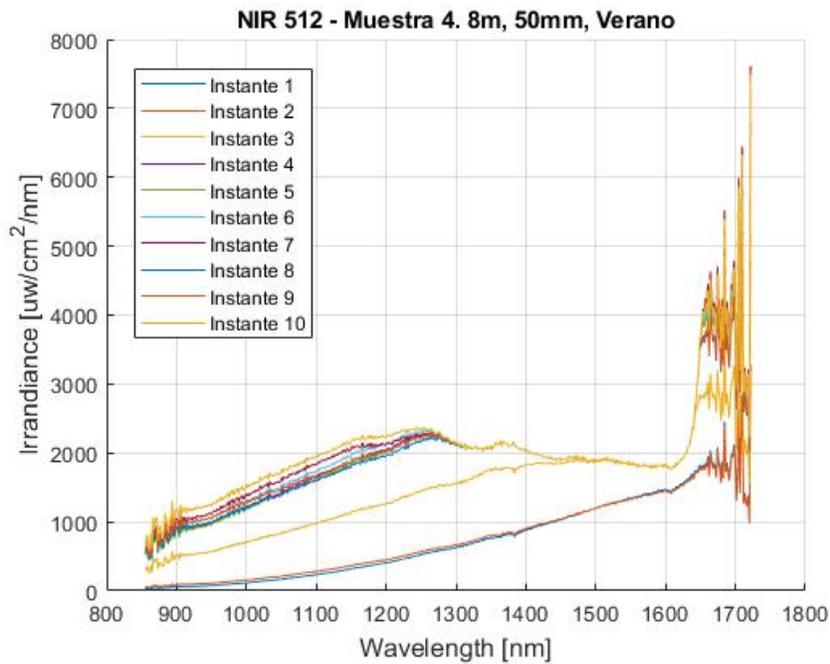


Fig. 4.19: Medición madera 2, muestra 4

De manera análoga, se presenta las mediciones de los anillos primavera:

Madera 1 - Pino Radiata, Anillo Primavera

- Muestra 1, anillo primavera:

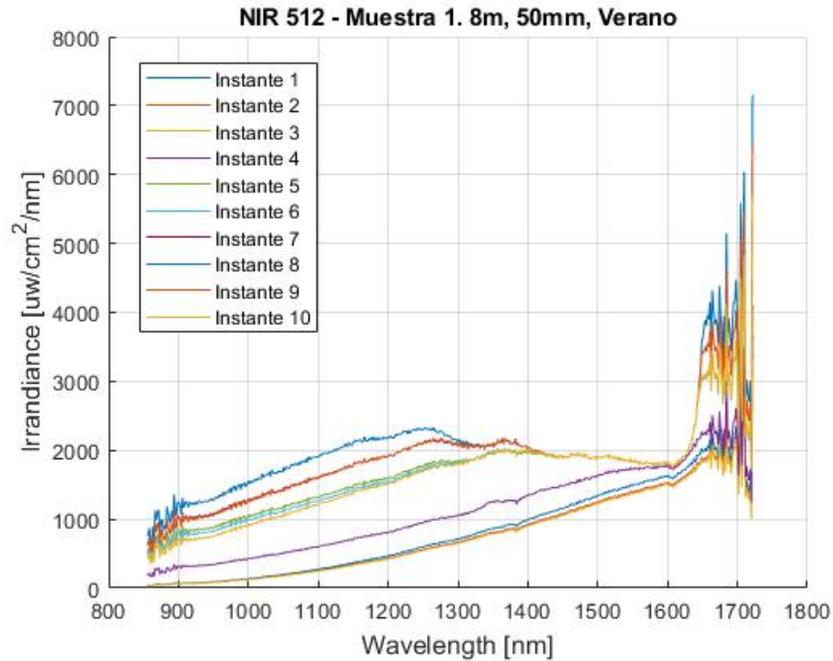


Fig. 4.20: Medición madera 1, muestra 1

- Muestra 2, anillo primavera:

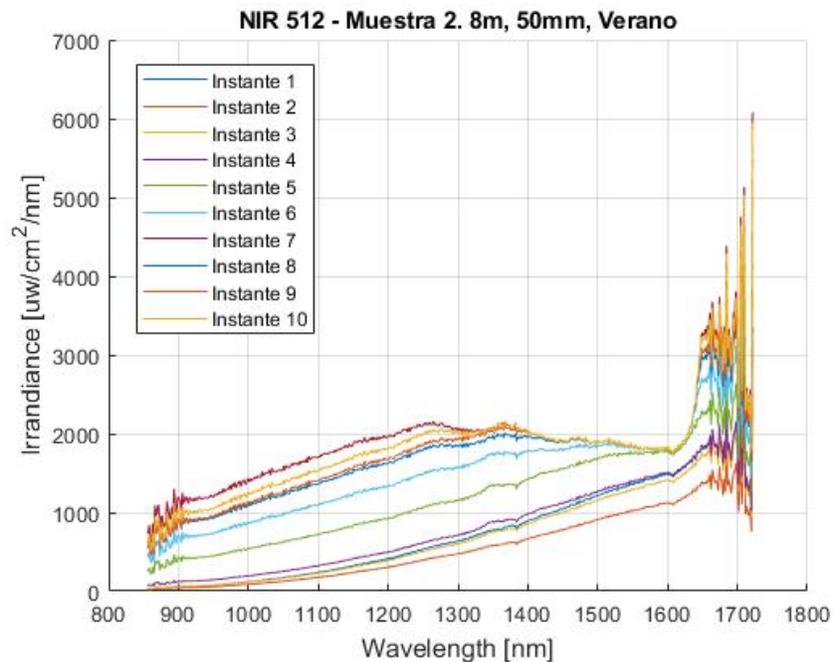


Fig. 4.21: Medición madera 1, muestra 2

- Muestra 3, anillo primavera:

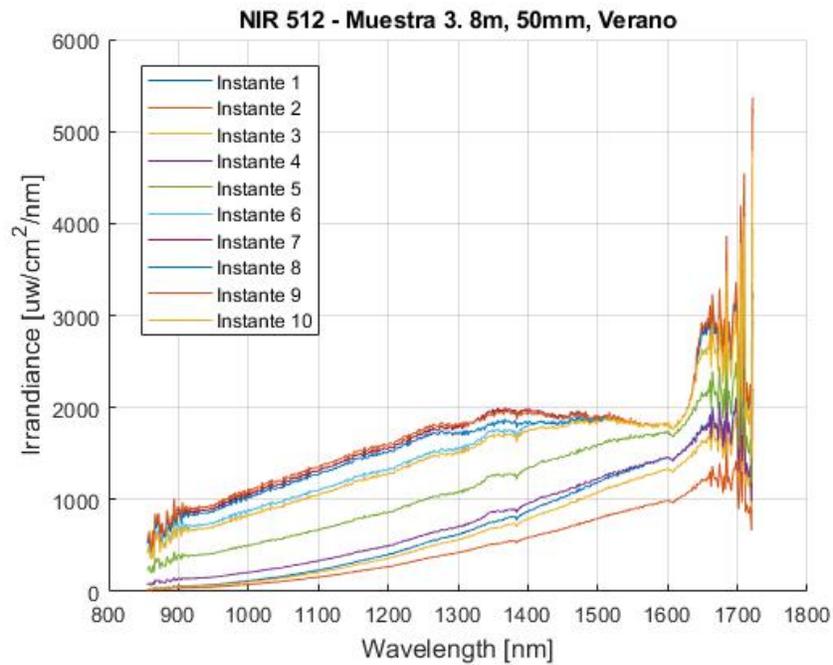


Fig. 4.22: Medición madera 1, muestra 3



- Muestra 4, anillo primavera:

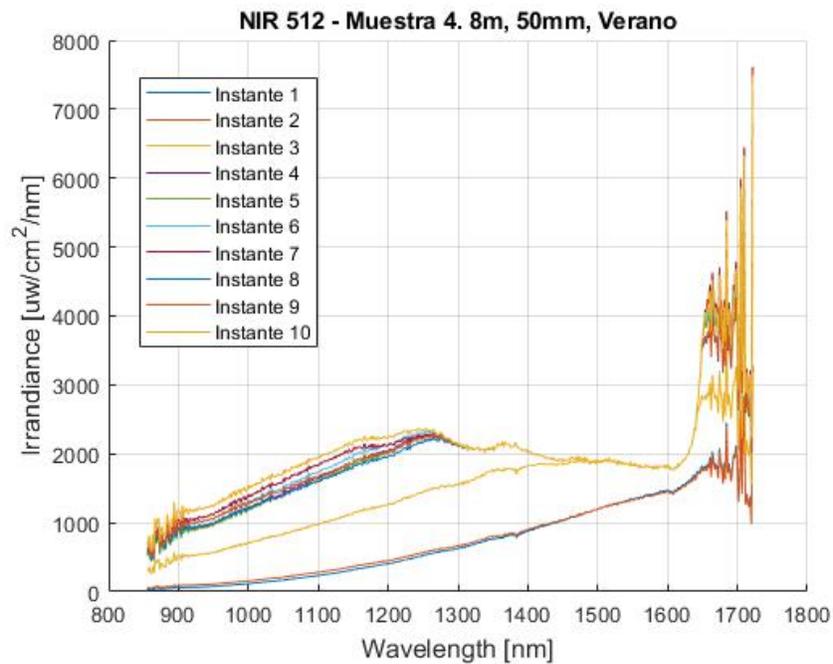


Fig. 4.23: Medición madera 1, muestra 4

Madera 2 - Pino Radiata, Anillo Primavera

- Muestra 1, anillo primavera:

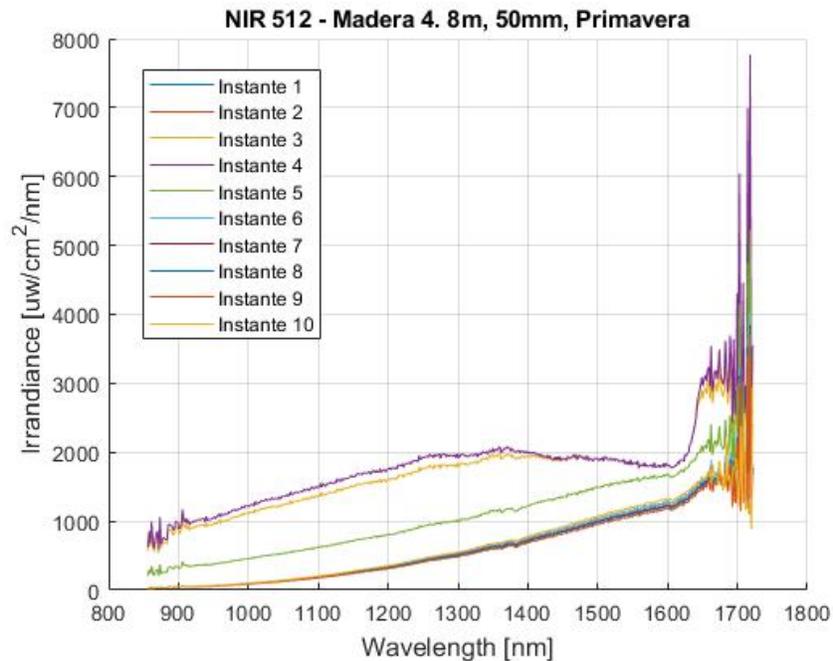


Fig. 4.24: Medición madera 2, muestra 1

- Muestra 2, anillo primavera:

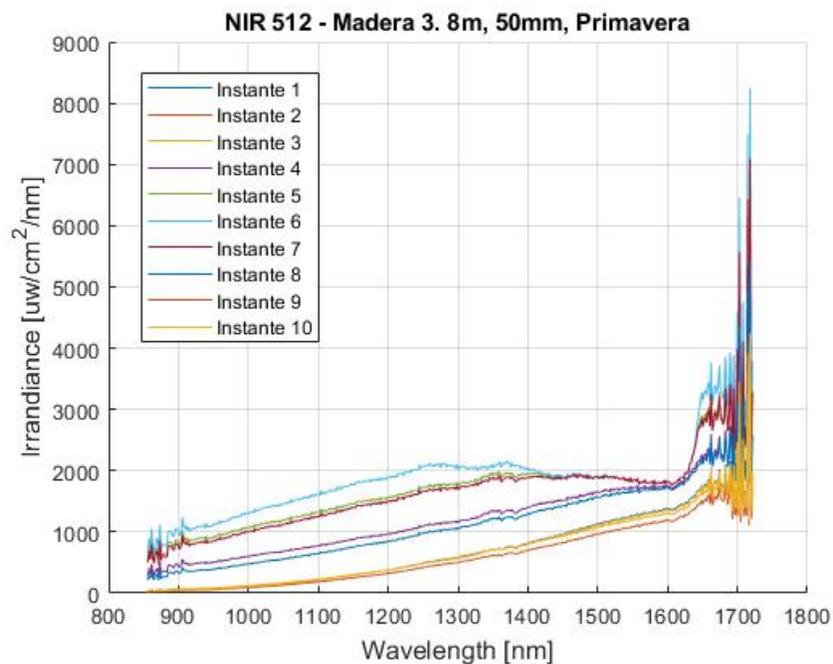


Fig. 4.25: Medición madera 2, muestra 2

- Muestra 3, anillo primavera:

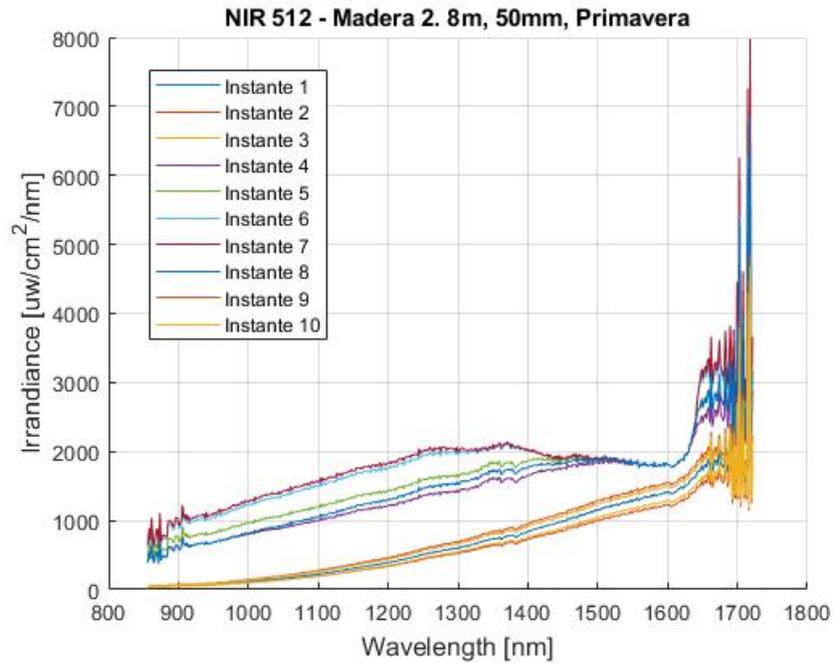


Fig. 4.26: Medición madera 2, muestra 3



- Muestra 4, anillo primavera:

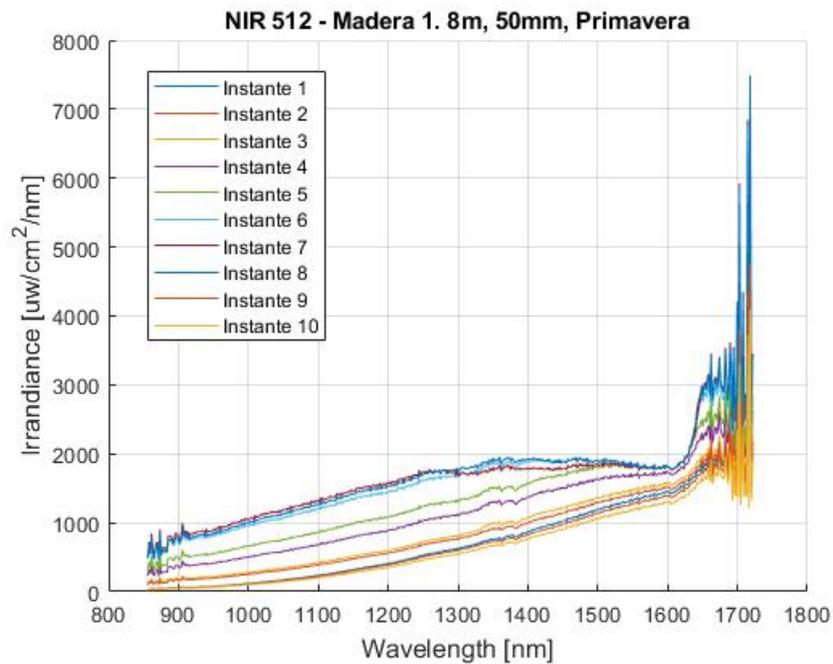


Fig. 4.27: Medición madera 2, muestra 4

4.4. Estimación de Temperatura utilizando ambos Métodos

El proceso de estimación de temperatura, en un primer momento estaba dado por hallar la longitud de onda en el rango SWIR donde ocurrió la máxima radiación, ya que debido a la ley física del desplazamiento de Wien, esta longitud de onda presentará la información espectral para hallar la temperatura exacta del cuerpo. Debido a que el ATP 8000 presento un bajo rendimiento en comparación del NIR 512 para mediciones de llamas de biomásas, reinventamos la idea principal por una estimación de la curva que presentará el espectro combustionado del cuerpo y con ello estimar temperatura. Según nuestro criterio, cómo corresponde a una estimación debemos validar dicha suposición y para ello, validaremos los datos con el método de las 2 longitudes de onda en el VIS.

Las mediciones con el NIR 512 se encuentran en el rango $0,9 - 1,7[nm]$. La estimación de la curva se estimará hasta los $2500[nm]$. Para obtener una estimación más real utilizaremos la métrica de comparación GFC, cual comparará el modelo de radiación de cuerpo negro a diferentes valores de temperatura. En el proceso se utilizaron 500 curvas de comparación, cuales variaban a temperaturas de $1700K$ hasta los $3000K$. La métrica GFC comparó todas las curvas con todo el pool de los espectros adquiridos, seleccionando la estimación que presentaba mejor valor de GFC.

A continuación se presentan las estimaciones de curva, utilizando métrica de comparación GFC junto a la radiación de planck para un pool de 500 curvas a diferentes temperaturas:

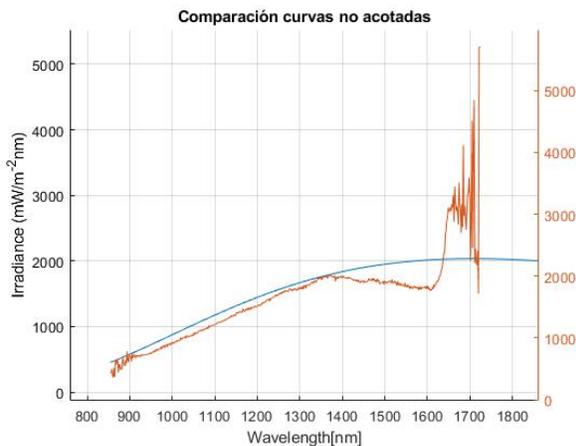


Fig. 4.28: Estimación Promedio de Madera 1 Verano.

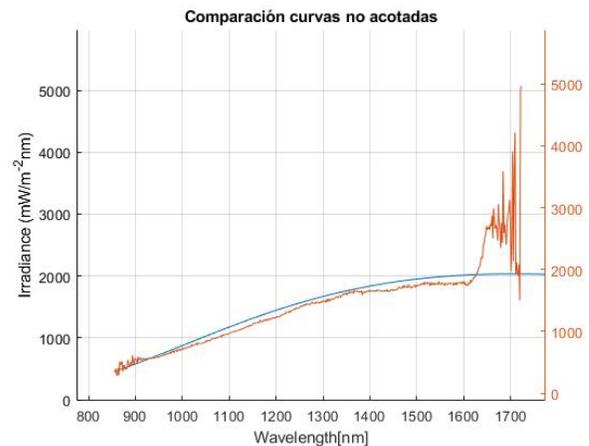


Fig. 4.29: Estimación Promedio de Madera 2 Verano.

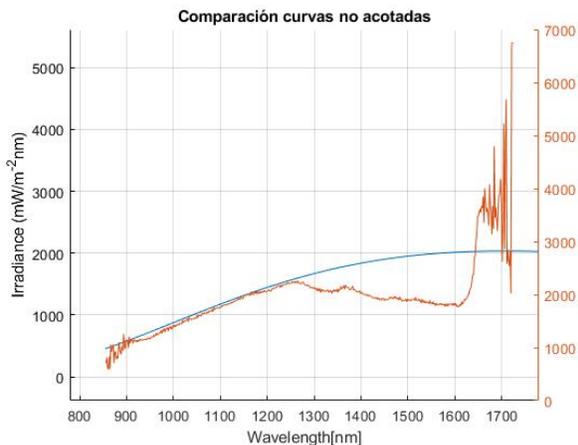


Fig. 4.30: Estimación Promedio de Madera 1 Primavera.

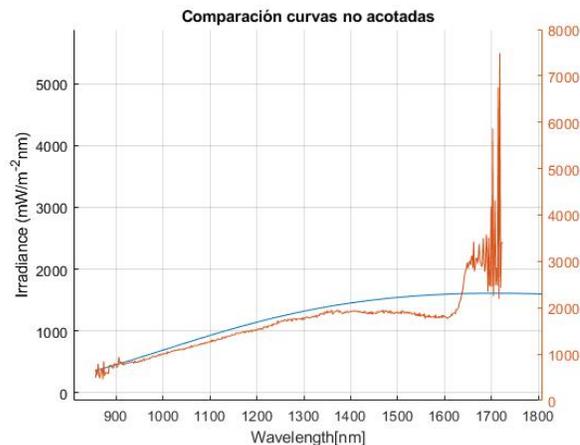


Fig. 4.31: Estimación Promedio de Madera 2 Primavera.

Si bien es evidente que la estimación no es perfecta, debido a la gran presencia de bandas de absorción en la biomasa, complementaremos este detalle, validando los resultados con mediciones en el rango VIS y el cálculo de temperatura mediante el método de las 2 longitudes de ondas.

La mediciones en el rango VIS fueron efectuadas por el equipo HR4000, previamente calibrado y utilizando las mismas configuraciones fijadas. El setup actuó de forma simultánea en la toma de mediciones. Por ende es fundamental destacar que las mediciones corresponden a la mismas muestras en el mismo tiempo combustionado, con la diferencia que se obtuvieron 20 adquisiciones de espectros por muestras. Se presentan los espectros adquiridos:

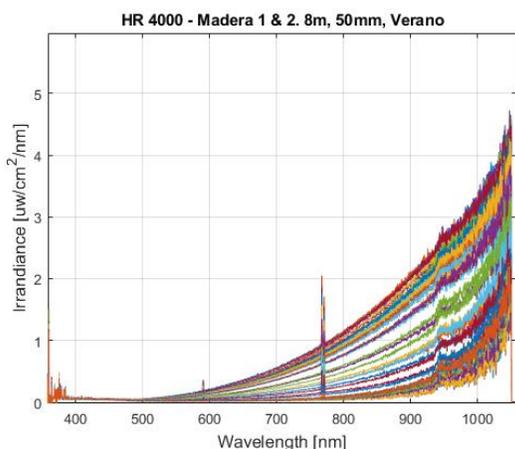


Fig. 4.32: Mediciones Madera 1 - Anillo Verano, Rango Visible

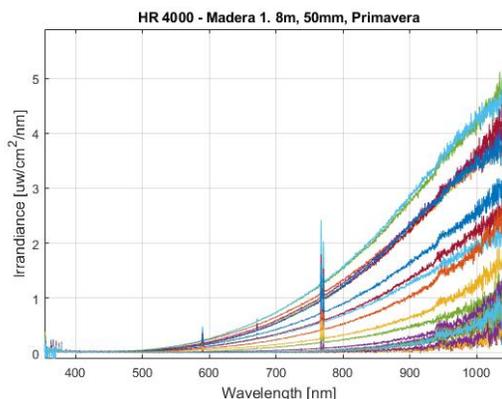


Fig. 4.33: Mediciones Madera 1 - Anillo Primavera, Rango Visible

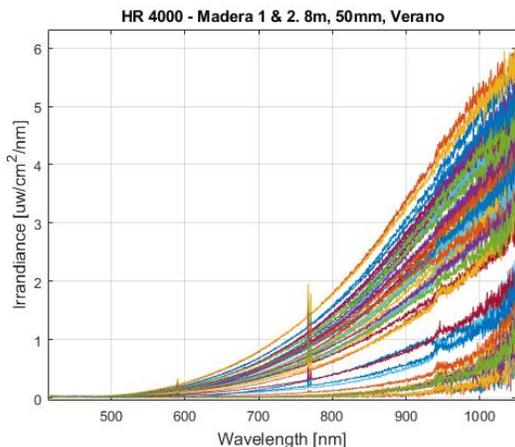


Fig. 4.34: Mediciones Madera 2 - Anillo Verano, Rango Visible

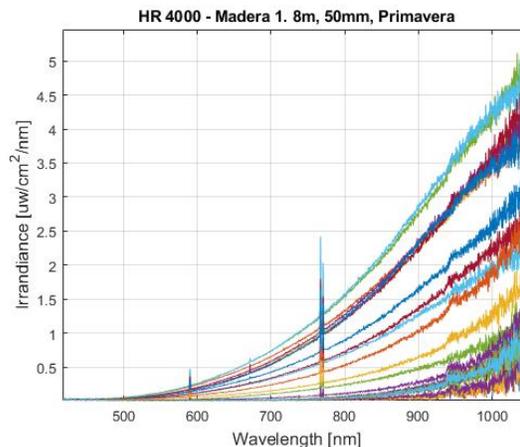


Fig. 4.35: Mediciones Madera 2 - Anillo Primavera, Rango Visible

Con los espectros adquiridos, se estimó la temperatura utilizando como punto de comparación las longitudes de onda $\lambda_1 = 570[nm]$ y $\lambda_2 = 620[nm]$, es fundamental seleccionar bandas que no se encuentren afectados por efectos de absorción ni emisión, además, deben ser próximas entre sí. Por lo tanto, utilizando el método de estimación de temperatura de las 2 longitudes de onda para cada promedio de muestras de diferente origen de anillos.

- Estimación de temperatura utilizando ambos métodos

Promedio de muestras	Temperatura AVG Método Ley de Desp. de Wien (K)	Temperatura AVG Método 2 Long. de ondas (K)
Madera 1, Verano	1782	1997
Madera 2, Verano	1771	1930
Madera 1, Primavera	1712	2014
Madera 2, Primavera	1739	1768

Tabla 4.1: Estimación de temperatura utilizando ambos métodos

Por otra parte, es claro notar la presencia de bandas de emisión, para ello aplicaremos la teoría estudiada en nuestra revisión científica.

En el espectro electromagnético, existe la presencia de longitudes de onda discontinuas las cuales indican la presencia de un elemento o un compuesto químico. Particularmente en la

madera o en casi todo material orgánico existe la presencia de Sodio y Potasio. En nuestro caso, existe documentación sobre esta banda de emisión para combustiones de pino radiata y la presencia de estas bandas de emisión corresponden a la presencia de los elementos ya mencionados en las bandas 588[*nm*] y 766[*nm*] respectivamente. A modo de dejar más en claro esta característica, se presenta la siguiente Figura:

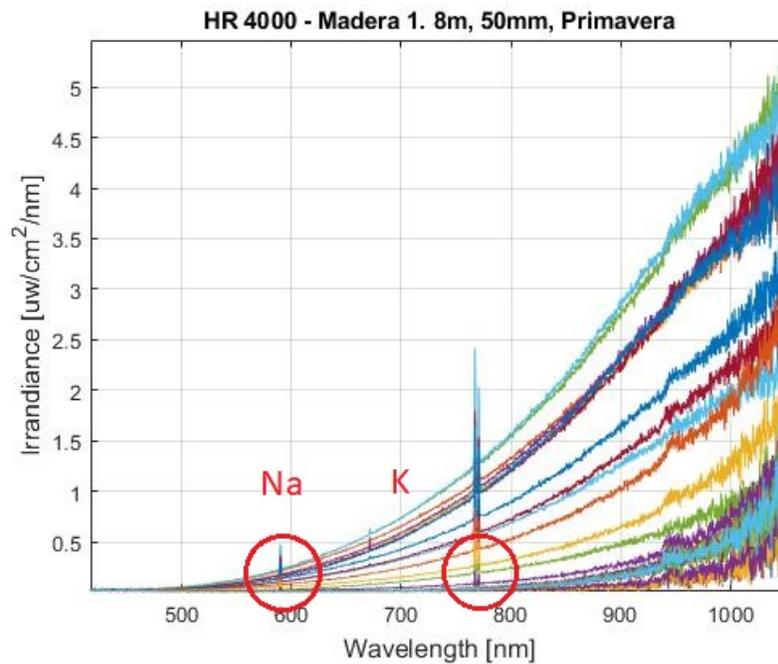


Fig. 4.36: Elementos bandas de Emisión VIS

Finalmente, la procedencia del anillo de donde proviene la madera no tiene relevancia en el cálculo de temperatura pero si para estudios espectrométricos.

5. Conclusiones

En la investigación presente se estudiaron los aspectos teóricos y prácticos sobre la estimación de temperatura a través del uso de espectrofotómetros en unidades radiométricas utilizando la Ley de desplazamiento de Wien como método fundamental.

En el transcurso de las mediciones experimentales, se concluyó que el espectrofotómetro *NIR 512* posee un SNR mejor que el equipo *ATP 8000*, a pesar de utilizar el mismo semiconductor, la variación del índice de dopaje provoca que este instrumento sea muy sensible al Johnson Nyquist Noise, generando mediciones muy ruidosas a altas temperaturas.

La adquisición de espectros fue realizada por el equipo *NIR 512* en el rango de los 900 – 1700 [nm]. La aproximación mediante métrica GFC presentó un factor de comparación del 93%. La temperatura obtenida entre valores cercanos a los 1900 grados Kelvin fue contrastada por el método de las dos longitudes de onda, obteniendo una correlación del 16% como tal.

Los espectros adquiridos en unidades radiométricas en el rango VIS presentan las bandas de emisión típicas de la materia orgánica proveniente de los elementos sodio y potasio en las bandas 588 [nm] y 766 [nm] respectivamente, mientras que en el rango NIR se visualiza la existencia de una gran banda de absorción en el rango de los 1400 – 1600 [nm], fenómeno que según investigaciones anteriores caracteriza el porcentaje de humedad presente en la madera.

La investigación realizada es el primer paso para el surgimiento de nueva técnica de estimación de temperatura como método sin contacto que además otorga la posibilidad de conocer bandas de emisión y absorción presentes de la fuente estudiada. Si bien, los resultados muestran una alta correlación entre ambos métodos, sería ideal utilizar el equipo *ATP 8000* ya que posee mayor rango espectral, desde los 900 – 2500 [nm] y se estima que la máxima emisión real se encuentra entre los 1600 – 1800 [nm].

Finalmente, se concluye que la estimación de temperatura mediante la Ley de desplazamiento de Wien es un método sin contacto confiable y prometedor. Es por ello, que para futuras investigaciones se propone la mejora del setup óptico a través de un cambio de la rendija de abertura (Entrance Slit) del equipo *ATP 8000* a una con una abertura mínima de 25[μ m], modificación que generará una mejor SNR del instrumento.

Bibliografía

- [1] J. Jian Chen, Xin Li, “Recent progress in improving the performance of infrared photodetectors via optical field manipulations.”
- [2] R. A. R. Manríquez, “Universidad de concepción,” *Estudio Espectrométrico de una Llama de Concentrados de Cobre*, 2011.
- [3] P. V. Martín-Mateo, “Universidad de alcalá,” *Estimación de contenido de humedad de la vegetación mediante Espectro-radiometría*, 2011.
- [4] S. Briz, “University carlos iii de madrid,” *Teledetección infrarroja de gases atmosféricos mediante Espectrorradiometría FTIR*, 2014.
- [5] Alan S. Morri, Reza Langari, *Measurement and instrumentation: theory and application*, 2012.
- [6] E. G. González, “Universidad de sevilla,” *Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría*, 2006.
- [7] K. Academy, “Introducción a las ondas electromagnéticas.”
- [8] U. N. A. de México, “Irradiancia y radiancia.”
- [9] Carlos Toro Navarrete, “Desarrollo de sistemas de adquisición multiespectral para el monitoreo y caracterización de procesos industriales,” Ph.D. dissertation, Universidad de Concepción, 2014.
- [10] D. D. G. S. y Dr. Roberto A Parra, “Universidad de concepción,” *Estudio Espectrométrico de una Llama de Concentrados de Cobre*, 2011.
- [11] D. L. A. Parada, “Sensores Ópticos: Capítulo radiometría espectral - fuentes térmicas de radiación: Representación de un blackbody.”
- [12] Luis Arias Parada, “Medición de la información espectral global: nueva técnica para fotodetección de llama y control del proceso de combustión usando un arreglo basado en fotodiodos,” Ph.D. dissertation, Universidad de Concepción, 2009.

- [13] Miguel A. López-Álvarez, Javier Hernández-Andrés, Javier Romero, F. J. Olmo, A. Ca-zorla, and L. Alados-Arboledas, “Using a trichromatic ccd camera for spectral skylight estimation,” *Appl. Opt.* 47, H31-H38, 2008.
- [14] American Physical Society, “Thermal agitation of electricity in conductors,” Ph.D. disser-tation, APS Physics, 1928.
- [15] L. A. P. PhD., “Sensores Ópticos - fotodetección.” [Online]. Available:
- [16] O. Optics, “Datasheet ocean optics nir-512.” [Online]. Available: <https://www.labx.com/product/ocean-optics-nir-512>
- [17] OPTOSKY, “Datasheet atp series-8000 near infrared spectrometers.” [Online]. Available: <https://optosky.com/nirspectrometer.html>
- [18] W. B. PHOTONICS, “Dh-3p-cal.” [Online]. Available: <https://whitebearphotonics.com/products/dh-3p-cal>
- [19] Fernando Castillo, *Obtención del Vector de Calibración*, noviembre de 2021.

