



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ANÁLISIS DEL ESTRÉS HÍDRICO EN PLANTAS Y CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL
DE UN SISTEMA PLENÓPTICO EN LA BANDA SWIR**

POR

Joaquín Alonso Lermanda Sandoval

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil Electrónico(a)

Profesor(es) Guía
Sergio Neftalí Torres Inostroza

Junio 2023
Concepción (Chile)
©2023 Joaquín Alonso Lermanda Sandoval

©2023 Joaquín Alonso Lermada Sandoval

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

A mis padres y hermano, quienes apoyaron mi desarrollo profesional y más importante aún, mi desarrollo personal. Y a Héctor Rodríguez, profesor y ejemplo a seguir en rectitud y enseñanza.

Agradecimientos

Deseo agradecer a los profesionales y docentes que se hicieron el tiempo explicándome y ayudándome en la presente investigación, entre los nombres que quiero destacar están:

- Profesor Sergio Torres, por confiar y darme la oportunidad de trabajar con él en este proyecto.
- Jonathan Torres, por ofrecerme esta oportunidad y ser un pilar confiable de conocimiento, apoyo y amistad en el trabajo.
- Pablo Gutiérrez, por las incontables explicaciones y tiempo dedicado a ayudar.
- Francisco Pérez, por las sucesivas correcciones e ideas sobre qué metodologías emplear.
- Franco Rivas, por la ayuda prestada en la realización de los experimentos y la disponibilidad de prestar asistencia en todo momento.

Finalmente, deseo agradecer a la Universidad de Concepción, en particular al departamento de ingeniería eléctrica y su staff docente, que durante mi formación de ingeniero me entregaron las herramientas para poder desarrollarme como profesional y llegar a estas instancias.

Sumario

El avance e invención de nuevas técnicas de captura de imágenes infrarrojas en los últimos años han permitido no solamente obtener imágenes más detalladas, sino que además obtener información de una escena cualesquiera que, sin las previamente mencionadas técnicas, no se podría conocer. Los ámbitos en los cuales se desempeña el infrarrojo (IR) son tan variados como únicos, implicando así que no existe una sola solución correcta para los problemas existentes. Una de estas dificultades corresponde a la de como eliminar el ruido en este espectro, obstáculo el cual afecta drásticamente la fidelidad de los datos obtenidos de una escena en IR y en la mayoría de los casos hace imposible analizar la información de manera fidedigna. La presente investigación se centra alrededor de como lidiar con el Fixed Pattern Noise (FPN) mediante un algoritmo de reenfoque, como una alternativa a la calibración con cuerpo negro. Se evalúan los resultados obtenidos mediante el uso de métricas y se compara con los resultados obtenidos con un cuerpo negro. Se eligen plantas como objeto de estudio debido a que en la longitud de onda mencionada se puede apreciar los niveles de estrés hídrico. Se cuantizará el mejoramiento de imagen en diferentes longitudes de onda de este espectro, generando así un cubo multiespectral, el cual permitirá el análisis en el espectro del fenómeno del FPN.

Summary

The advancement and discovery of new infrared (IR) image capturing techniques in recent years has allowed not only to obtain more detailed images, but also get information of any scene that, without the aforementioned techniques, it wouldn't be possible to obtain. The areas in which IR performs are as different as they are unique, implying that there's not a single solution that encloses all problems. One of these hardships is how to deal with the noise that affects this spectrum, this obstacle distorts heavily the fidelity the data acquired obtained from a scene in IR and in most cases it makes impossible to analyze the information. The investigation centers itself around how to fix the Fixed Pattern Noise (FPN) using a refocusing algorithm, as an alternative of a black body calibration. Plants are chosen because of their particular behaviour in the spectrum mentioned, where they exhibit the hydric stress levels. The elimination of noise with a lightfield analysis approach will be revised and the image quality improvement will be defined according to different length waves in the SWIR, this will generate a multispectral cube that will allow a full spectrum revision of the FPN phenomenon.

Índice

1. Capítulo 1: Introducción	9
1.1. Estrés	9
1.1.1. Estrés Hídrico y factores de estrés	9
1.2. El Espectro electromagnético	10
1.2.1. Tipos de espectros	10
1.2.2. Ley de Kirchoff y comportamiento de radiación	11
1.2.3. Ley de desplazamiento de Wien	12
1.2.4. El cubo Multiespectral	13
1.3. Infrarrojo	14
1.3.1. Bandas espectrales: NIR, SWIR, MWIR y LWIR	14
1.3.2. Ruido de patrón fijo (FPN)	16
1.4. Plenóptica	17
1.5. Estado del Arte	18
1.5.1. Estrés en Plantas en IR	18
1.5.2. Eiminación de FPN	19
1.5.3. Métricas	19
1.6. Objetivos	20
1.6.1. Objetivo General	20
1.6.2. Objetivos específicos	20
1.6.3. Alcances y limitaciones	20
2. Capítulo 2: Marco Teórico	21
2.1. Lightfield y Fourier Slice Photography Theorem	21
2.1.1. Lightfield	21
2.1.2. Operador de fotografía plenóptica	22
2.2. Calibraciones	24
2.2.1. Calibración de dos puntos con cuerpo negro	24
2.2.2. Eliminación mediante plenóptica	25
2.3. Métricas	26
2.3.1. Image Quality Index	26

2.3.2.	Roughness Laplacian Pattern Index	27
2.3.3.	SSIM	29
3.	Capítulo 3: Set-up experimental	30
3.1.	Escena propuesta	30
3.1.1.	Calibración	30
3.2.	FPN y cuerpo negro en el espectro	31
3.2.1.	Parámetros y condiciones	31
3.2.2.	Cuantización del FPN a lo largo de espectro	32
3.3.	Equipo y Escena	35
3.3.1.	Equipo	35
3.3.2.	Escena	36
3.4.	Resultados	38
3.4.1.	FPN y plenóptica	38
3.4.2.	Plano focal	38
3.4.3.	Blur y enfoque óptimo	40
3.4.4.	Estrés en el espectro	41
3.5.	Discusión y Conclusiones	43
3.5.1.	Resultados	43
3.5.2.	Discusión, limitaciones y trabajo a futuro	43
4.	Anexo	53
4.0.1.	Fourier Slice Theorem y Fourier Slice Photography Theorem	53
4.0.2.	RLP a lo largo del espectro	56
4.0.3.	Focus Stacking	57

Índice de cuadros

1. Comparación de cambios de *blur* y FPN a lo largo del eje z 27

Índice de figuras

1.1.	Espectro electromagnético. Las diferencias en frecuencia y por consiguiente longitud de onda definen a qué categoría pertenece la señal. Cortesía de NASA	11
1.2.	Comportamiento de la radiación en un objeto cualesquiera. Notar como difiere enormemente el comportamiento de la radiación que es absorbida con la transmitida y la reflejada[32].	11
1.3.	Representación gráfica de la ley de desplazamiento de Wien. A medida que la temperatura del cuerpo negro aumenta el <i>peak</i> de emisividad se desplaza a longitudes de onda mayores[33].	13
1.4.	Cubo multiespectral e Hiperespectral, cortesía de NIREO.	14
1.5.	Desglose del espectro IR, las secciones corresponden a NIR(<i>Near Infrared</i>), SWIR(<i>Short Wave Infrared</i>), MWIR(<i>Mid Wave Infrared</i>) y LWIR(<i>Long Wave Infrared</i>)[50].	15
1.6.	FPN presente en una cámara Xeva 320 SWIR.	16
1.7.	Efecto en la profundidad de campo de: (a) Apertura del lente, (b) Milimetrage del lente, (c) Distancia entre cámara y objeto. Cortesía de TLW Photography.	18
1.8.	de izquierda a derecha el reenfoque se realiza acercándose a la cámara. Las imágenes corresponden a los <i>slides</i> a) 9, b) 54 y c) 134.	18
2.1.	Representación visual del <i>light slab</i> de M. Levoy. Notar como se definen dos planos.	21
2.2.	Parametrización de Ren Ng del <i>light slab</i> . Se define un lente y un sensor.	22
2.3.	Re-parametrización del <i>lightfield</i> moviendo el sensor desde F a F'	23
2.4.	Eliminación de FPN en camara Xeva 320, a) Original, b) Corrección mediante calibración de dos puntos por cuerpo negro utilizando un filtro de 1600. Intervalo 175°C - 200°C.	25
2.5.	Modelo de ruido ubicado en el infinito óptico desarrollado por Coelho. El cambio corresponde a uno de concepto que permite mirar desde otro punto de vista la problemática. Imagen cortesía de Coelho [71].	25
2.6.	(a)Gráfico de <i>blur</i> y FPN a lo largo de los distintos <i>slides</i> , (b) Slide 137, el cual corresponde al de menor <i>blur</i> en el OOI.	28
2.7.	Blur y FPN de fondo en una medición plenóptica, dependiendo del tipo de ruido, profundidad de campo y factores de la escena, puede ser necesario utilizar valores distintos para los parámetros del algoritmo.	28
2.8.	(a) Imagen original limpia, cortesía de MATLAB. (b) Imagen alterada con un filtro de desenfoque.	29
2.9.	(a) Imagen original limpia, cortesía de MATLAB. (b) Imagen alterada con ruido gaussiano añadido.	29

3.1. <i>setup</i> de medición con cuerpo negro. Se utiliza una cámara Xeva 320 SWIR y un cuerpo negro con un rango de 100 °C-400°C.	31
3.2. Cuerpo negro a distintas temperaturas, a) 100 °C, b) 200 °C (utilizando un filtro de 1600 nm). Se logra apreciar que la intensidad de pixel en la imagen va en aumento a medida que se utilizan temperaturas más altas.	31
3.3. A la izquierda el comportamiento de ganancia a lo largo del espectro de varios píxeles con temperatura fija, a la derecha el comportamiento de un solo pixel (pixel 4) a distintas temperaturas.	32
3.4. A la izquierda el comportamiento de <i>offset</i> a lo largo del espectro de varios píxeles con temperatura fija, a la derecha el comportamiento de un solo pixel (pixel 4) a distintas temperaturas.	32
3.5. Promedio de cuentas digitales con: a) 1360 nm, b) 1680 nm. Es posible distinguir que la temperatura posee distintas pendientes dependiendo del tramo que se revise, notándose que el tramo 175 °C a 200 °C es el de mayor pendiente.	33
3.6. La aplicación de la corrección en el tramo 175°C a 200°C para a) 1360 nm. b) 1680 nm.	34
3.7. (a) Desplazador y computador utilizado (b) Filtros utilizados en la montura.	35
3.8. (a) Cámara Xeva 320 con montura de filtro (b) <i>Quantum Efficiency</i> (QE) a lo largo del espectro, cortesía de Xenics. Notar el peak de eficiencia se produce cerca de los 1600 y presenta valores bajos antes de los 1000 nm y en los 1700 nm.	35
3.9. (a) luz halógena utilizada, (b) Controlador de la luz halógena. Se establece un valor constante que ilumine la escena con el cual se puede asegurar condiciones de iluminación estables en el experimento.	36
3.10. a) <i>Pilea Peperomioides</i> , b) Hoja saludable, c) Hoja en evidente estrés hídrico.	36
3.11. (a) Plantas iluminadas ubicadas ambas en el FOV de la cámara, (b) Cámara y desplazador mecánico junto a luz halógena.	37
3.12. Escena completa, plantas están ubicadas a las distancias descritas anteriormente y la luz externa es eliminada mediante las cortinas en las ventanas.	37
3.13. Gráfica con los valores de SSIM entre imágenes con corrección mediante reenfoque plenóptico y reenfoque con calibración de dos puntos (a) Escena completa, (b) OOI.	38
3.14. Plantas re-enfocadas en el SWIR. De izquierda a derecha se muestra como el reenfoque va limpiando de ruido la escena hasta eliminar el ruido y enfocar las plantas.	39
3.15. (a) Planta en el espectro visible (b) Planta en el SWIR en la banda 1400 nm. En el SWIR se distingue claramente como la mayor intensidad de pixel está asociado con un mayor deterioro de la hoja, mientras que las hojas de menor intensidad se relacionan con un menor estrés hídrico. Esto independiente de la coloración amarilla o verde de la hoja en el espectro visible.	39

3.16. Comparación entre el filtro de 1080 nm y el de 1500 nm. Si bien ambos identifican el mismo <i>slide</i> como el de óptimo enfoque, difieren enormemente en determinar el grado de nitidez de la imagen elegida, donde la de menor variación corresponde a la de 1080 nm, mientras que la de mayor variación es la de 1500 nm.	40
3.17. (a) Reflectividad absoluta porcentual de una hoja hidratada comparada a una hoja estresada hídricamente (b) Emisividad porcentual de ambos OOI. Notar como la emisividad (y por ende absorbancia) y la reflectancia son inversamente proporcionales.	41
3.18. Escena bajo un filtro de 1460 nm, considerado el filtro que presenta el mayor contraste para identificar estrés hídrico. Notar como es visiblemente notoria la diferencia entre una zona seca y una hidratada en cada hoja.	42
3.19. (a) Cuentas digitales de hoja sin estrés hídrico (b) Cuentas digitales de hoja con estrés hídrico. La distribución de cuentas digitales en la hoja seca se aglomera en 2 <i>peaks</i> distintos en intensidad, a diferencia de la hoja saludable, donde se aprecia un único <i>peak</i> . Esto muestra la presencia de 2 zonas distintas en la hoja seca que corresponden a zonas deshidratadas y a zonas saludables.	42
4.1. Representación visual de la relación entre proyección y corte.	53
4.2. Esquema del <i>Fourier Slice Theorem</i> aplicado a un objeto bidimensional.	54
4.3. Esquema del <i>Fourier Slice Photography Theorem</i> aplicado al <i>lightfield</i>	55
4.4. Detección de <i>blur</i> a lo largo de los 250 planos en el eje Z y a distintas longitudes de onda. Notar como el <i>slide</i> óptimo de enfoque va oscilando entre los valores de 75 y 80 dependiendo del filtro utilizado.	56
4.5. Resultado de realizar <i>Focus Stacking</i> en el arreglo de fotos generado mediante el algoritmo de reenfoque, Visualmente se nota como el fondo y la botella ambos están en foco.	57
4.6. De izquierda a derecha el comportamiento de los filtros y su intensidad promedio de pixel por temperatura: 1)1080, 2)1100, 3)1140, 4)1160, 5)1220, 6)1240, 5)1260, 6)1300, 7)1320, 8)1340, 9)1360, 10)1400.	58
4.7. De izquierda a derecha el comportamiento de los filtros y su intensidad promedio de pixel por temperatura: 1)1440, 2)1500, 3)1520, 4)1540, 5)1560, 6)1580, 7)1600, 8)1640, 9)1660, 10)1680, 11)1700.	59
4.8. Limpieza de FPN en cada filtro utilizado, de izquierda a derecha se tiene: 1)1080, 2)1100, 3)1140, 4)1160, 5)1220, 6)1240, 5)1260, 6)1300, 7)1320, 8)1340, 9)1360, 10)1400.	60
4.9. Limpieza de FPN en cada filtro utilizado, de izquierda a derecha se tiene: 1)1440, 2)1500, 3)1520, 4)1540, 5)1560, 6)1580, 7)1600, 8)1640, 9)1660, 10)1680, 11)1700.	61

1. Capítulo 1: Introducción

1.1. Estrés

1.1.1 *Estrés Hídrico y factores de estrés*

El mundo vegetal posee una serie de procesos de índole bioquímica los cuales han sido identificados y medidos con distintos métodos a lo largo de la historia. Las plantas como seres biológicamente pluricelulares presentan una complejidad considerable en su fisionomía y estructura celular. Uno de los ejemplos de proceso bioquímico es la fotosíntesis, proceso el cual ocurre a lo largo de todo el espectro del reino vegetal y produce una serie de productos que son identificados como lo son el oxígeno y la glucosa ($C_6H_{12}O_6$). Este proceso requiere que la planta reciba dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y luz del sol, obteniéndose así una planta que exhibe a simple vista estar saludable. Sin embargo, hay casos en los que, pese a verse saludable, la planta está muriendo por dentro. Inevitable es entonces hacerse la pregunta de que otros factores afectan la biología de la planta y como identificarlos oportunamente.

Las plantas son víctimas de factores ambientales disruptivos, bióticos y abióticos[1] que alteran su comportamiento y recursos disponibles. Entre los factores bióticos se consideran los patógenos y los herbívoros, mientras que los factores abióticos incluyen y no se limitan a bajas temperaturas, congelamiento, altas temperaturas, viento, desbalance nutricional, cercanía a otras plantas, luz recibida, déficit de agua, entre otros. Se estima que aproximadamente un 50% de las plantaciones mundiales se ven perdidas por factores abióticos[2]. Cada planta posee niveles distintos de cada uno de estos factores y la combinación de estos puede alterar para bien o para mal la salud de la planta [3][4]. La combinación de los efectos negativos y positivos en la vegetación recibe el nombre de estrés[5] y corresponde a un concepto generalizado sobre el estado de salud de la planta en relación con las condiciones de esta, basado en las respuestas que la planta genera al verse afectada por distintos factores.

Los incrementos en sequías, inundaciones y olas de calor producirán condiciones adversas contundentes al desarrollo de las plantas[6]. Se predice una disminución de tierra cultivable en conjunto a salinización del agua producto de la subida del nivel del mar[7]. Los cambios en temperatura, desplazarán a agentes patógenos y bacteria más eficientemente, prolongando así su hábitat a vegetación que no presentaba anteriormente estos problemas[8-10]. Estos cambios climáticos producto del calentamiento global aumentarán considerablemente los niveles de estrés de las plantas tanto biótica como abióticamente por lo que la correcta clasificación y entendimiento de como funciona el estrés en las plantas es vital para su desarrollo pleno.

Dentro de los tipos de estrés presentes en las plantas se identifica uno distinto por cada factor que afecta su crecimiento y desarrollo. El estrés de temperatura corresponde a la revisión de la emisividad de las hojas en

el dosel de estas[11-13]. Esto lleva a obtener valores asociados a las secciones que más reciben radiación solar y por ende son más susceptibles a cambios en emisividad y temperatura. El estrés de patógenos involucra los efectos de plagas y bacterias en las raíces y hojas [14], donde se puede comprobar la presencia de elementos invasivos mediante análisis espectral[15]. El estrés hídrico consiste en detectar los niveles de agua presentes en las hojas de la planta mediante diversos métodos que incluyen el análisis de la *stomata*[16][17] y de la absorción del agua en el infrarrojo (IR)[18].

El infrarrojo otorga una herramienta más con la cual analizar la respuesta espectral tanto de reflexión como de absorción y transmitancia de los componentes de una planta, entregando así información de manera no invasiva y eficiente. En VIS-NIR se puede detectar cambios de fluorescencia de los pigmentos basados en alteraciones de actividad fotosintética[19], a la vez que diferencias entre compuestos bioquímicos como nitrógeno y celulosa[20]. Las características absorbentes del agua notablemente visibles en el SWIR son utilizadas para determinar estándares de estrés hídrico[21]. Mientras que para el LWIR se ha usado para detectar el estrés mediante las temperaturas de las plantas, mostrando así resultados con base en emisión[22].

El enfoque que se ha tomado en esta investigación corresponde a la clasificación mediante espectrometría del estrés hídrico[24][25] utilizando una serie de métodos basados en el espectro infrarrojo para clasificar la presencia de agua.

1.2. El Espectro electromagnético

1.2.1 Tipos de espectros

El espectro electromagnético consiste en las distintas manifestaciones de la radiación en el universo, como se muestra en la figura 1.1. Un ejemplo de esto consiste en la visión humana, la cual consiste en la porción del espectro electromagnético que nosotros percibimos y definimos como los colores. La limitada visión humana no permite detectar longitudes de onda mayores o menores a lo visible; sin embargo, esto no significa que no podamos ver los efectos que se producen fuera de este rango.

Las ondas de radio son de las más populares en aplicaciones comerciales[25], son de baja energía y no causan daño al ser humano, por lo que son ideales para comunicaciones. Las microondas son utilizadas en comunicaciones satelitales y aplicaciones de antenas, debido a la gran cantidad de información que pueden proveer[26]. El infrarrojo provee una amplia gama de información a través de todas sus bandas, siendo el más conocido la detección de calor humano[27]. El ultravioleta ha demostrado ser útil en la eliminación de bacterias y en análisis forense de escenas del crimen[28][29]. Los rayos X son principalmente usados en el ámbito de la salud con el objetivo de observar los huesos[30]. Finalmente, los rayos gamma son utilizados limpieza y tratamiento de cáncer[31].

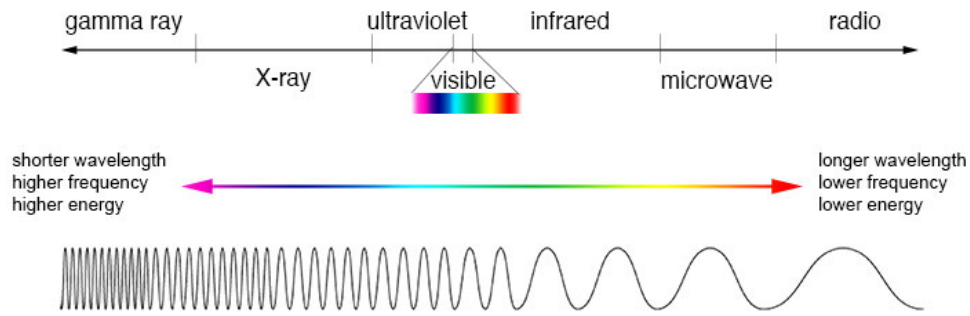


Figura 1.1: Espectro electromagnético. Las diferencias en frecuencia y por consiguiente longitud de onda definen a qué categoría pertenece la señal. Cortesía de NASA

El espectro electromagnético permite clasificar los tipos de onda, pero además nos entrega una posibilidad de diferenciar por aplicación cada una de las secciones descritas anteriormente.

1.2.2 Ley de Kirchoff y comportamiento de radiación

La radiación incidente en cualquier objeto sigue las reglas establecidas por la figura 1.2 donde la radiación se divide en 3 valores que son distintos para cada cuerpo que corresponden a reflectancia, transmitancia y absorbancia. La reflectancia es la radiación que se ve reflejada al no poder traspasar el objeto o ser absorbido por este. La transmitancia es la cantidad de radiación que traspasa el objeto al no ser absorbida o reflejada. Finalmente, la absorbancia es la radiación que el objeto absorbe al no reflejarse ni transmitirse. Las relaciones descritas se pueden resumir en la ecuación 1.

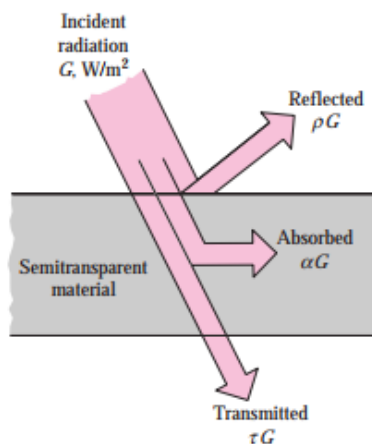


Figura 1.2: Comportamiento de la radiación en un objeto cualesquiera. Notar como difiere enormemente el comportamiento de la radiación que es absorbida con la transmitida y la reflejada[32].

$$T + R + A = 1 \tag{1}$$

Donde $T = \textit{Transmitancia}$, $R = \textit{Reflectancia}$ y $A = \textit{Absorbancia}$. Debido a conservación de energía, la suma de los tres valores deben de dar 1, esto permite identificar cuanto es el valor de uno de los valores si se conocen los otros dos. Existen situaciones en las cuales uno puede asumir nulo el valor de una de estas variables; sin embargo, si el efecto de asumir un valor es notorio, no es recomendable considerar este camino.

De acuerdo a Kirchoff[32] la radiación absorbida por un objeto debe ser igual a la radiación emitida por este en el equilibrio térmico. La definición anterior corresponde a la de un cuerpo negro, un objeto ideal. Este resultado, si bien aplica para un cuerpo ideal, es también posible utilizarlo en cuerpos no ideales con el fin de obtener un factor de emisividad que caracteriza la emisividad de un objeto cualesquiera, como se muestra en la ecuación 2.

$$\epsilon = W'/W \quad (2)$$

Donde ϵ corresponde a la emisividad de un objeto, W' es la radiación emitida por el objeto y W es la radiación emitida por un cuerpo negro a cierta temperatura. Con esta ecuación se puede obtener emisividad de cualquier objeto siempre y cuando se esté en equilibrio térmico con un cuerpo negro conocido. Volviendo a la ecuación 1 reemplazamos la absorbancia por emisividad, obteniendo lo descrito en la ecuación 3 para un objeto en específico.

$$T + R + \epsilon = 1 \quad (3)$$

La ley de Kirchoff de emisividad entrega una herramienta de análisis que permite determinar las características de emisión de cualquier cuerpo siempre que se conozcan las condiciones y el cuerpo negro asociado. Es, por tanto, de vital utilidad si se desea definir el comportamiento de radiación de un objeto.

1.2.3 Ley de desplazamiento de Wien

Dentro de las relaciones que se pueden establecer entre temperatura y el espectro está la denominada ley de desplazamiento de Wien[33], mostrada gráficamente en la figura 1.3. La ley establece que la curva de radiación de un cuerpo negro a distintas temperaturas presenta un *peak* a distintas longitudes de ondas que son inversamente proporcionales a la temperatura. Es decir, una mayor temperatura implica que el *peak* de emisividad estará ubicado a una longitud de onda menor y viceversa. La ecuación 4 muestra el cálculo del *peak* de emisividad basándonos en la temperatura.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (4)$$

Donde λ_{max} corresponde a la longitud de máxima emisividad, b es la constante de desplazamiento de Wien de valor $2898 \mu K$ y T es la temperatura en K .

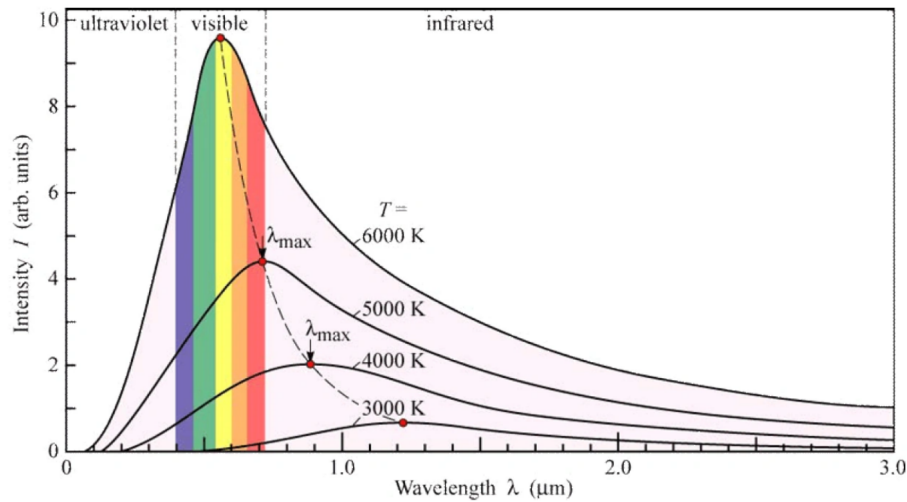


Figura 1.3: Representación gráfica de la ley de desplazamiento de Wien. A medida que la temperatura del cuerpo negro aumenta el *peak* de emisividad se desplaza a longitudes de onda mayores[33].

El espectro visible del ser humano es un buen ejemplo para entender este concepto, los objetos que están más calientes son percibidos como rojos y a mayores temperaturas se vuelven blancos. Esto es indicador de que el *peak* de emisividad se desplaza hacia menores longitudes de onda a medida que aumenta la temperatura, como se muestra en la figura 1.3. Por tanto, para longitudes de onda mayores como lo son la banda infrarroja, el *peak* de emisividad es a temperaturas menores, un ejemplo de esto son las cámaras térmicas que captan el calor humano. Es importante entender que la curva de desplazamiento permite determinar a qué temperatura utilizar el cuerpo negro dependiendo del espectro, además de poder definir cuál banda espectral es la más adecuada para cada escena.

1.2.4 El cubo Multiespectral

El análisis multiespectral consiste en la captura de una escena utilizando distintas longitudes de onda[34][35], esto generalmente se logra mediante el uso de filtros ópticos o bien haciendo uso de una cámara hiperespectral obteniéndose de este modo una tercera dimensión que consiste valores de longitud de onda. La inclusión de un tercer parámetro genera de esta manera un cubo multiespectral o hiperespectral dependiendo del método empleado. Se utilizará el término cubo multiespectral en esta investigación, considerando que el *modus operandi* fue utilizar filtros ópticos y reemplazarlos de manera manual.

El muestreo multiespectral se ha utilizado en distintas secciones del espectro y ha demostrado ser una herramienta eficiente de obtención de información del comportamiento de un objeto de interés, algunos de los

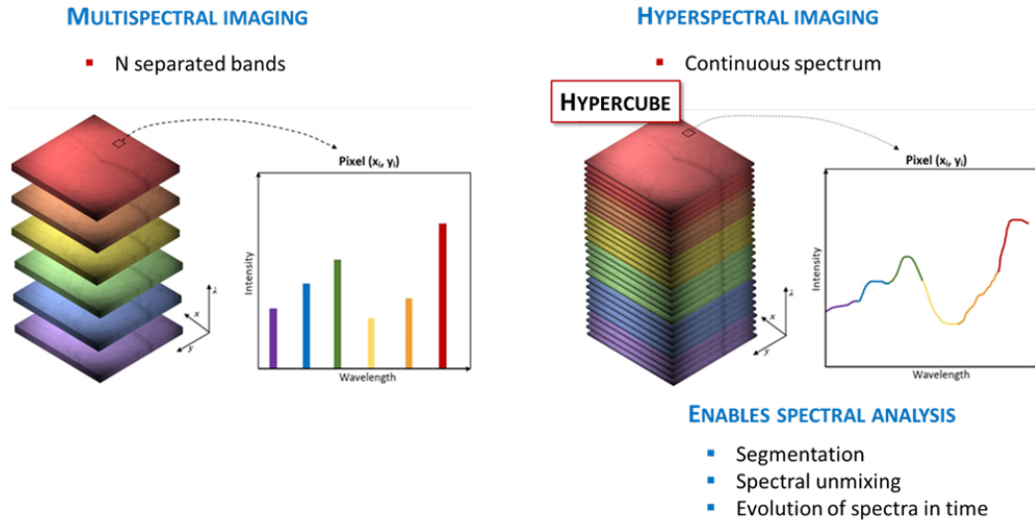


Figura 1.4: Cubo multispectral e Hiperespectral, cortesía de NIREO.

ámbitos en los cuales se ha desempeñado abarcan arqueología y arte[36], vegetación y agricultura[37], control de calidad de alimentos[38], criminología[39][40], entre otros.

Es justamente esta versatilidad de escenarios y de espectros donde puede utilizarse lo que la posiciona como una herramienta ideal para la revisión de fenómenos ópticos, permitiendo construir un histograma completo e identificar la frecuencia de interés donde se distinga claramente el fenómeno buscado.

1.3. Infrarrojo

1.3.1 Bandas espectrales: NIR, SWIR, MWIR y LWIR

En el espectro electromagnético se puede encontrar entre los 700 nm y 1 mm la banda infrarroja, conocida popularmente como la banda de detección de temperatura humana y detección de personas [41][42]. Sin embargo, estas aplicaciones corresponden a una subdivisión del IR solamente y las aplicaciones reales de esta tecnología van más allá de solamente detección de temperatura.

La captura y procesamiento de imágenes en el IR es un área de investigación que, debido a los beneficios que aporta al área militar[43], no ha sido desarrollada tan en detalle hasta recientemente de manera pública. Sin embargo, en el poco tiempo que lleva disponible han existido diversas aplicaciones en el mundo de la investigación e industria que lo han posicionado como una herramienta fiable y no invasiva de análisis de escenas. Ejemplos de escenas en las cuales el IR ha aportado de manera sustancial incluyen generación de mapas geotérmicos[44], reconocimiento facial[45] y agricultura e industria de alimentos [46][47] entre otros. En este último punto existen distintas áreas que van desde la revisión de calidad de alimentos[48] hasta detección de sequías[49]. Los niveles de agua en las plantas resultan de especial interés debido a las propiedades de absorción en el IR del

agua, motivo que impulso el desarrollo de esta investigación y el uso de diferentes técnicas para el desarrollo y estudio de la escena.

Las aplicaciones mencionadas, si bien son parte del IR, pertenecen a distintas longitudes de onda dentro de este y, por tanto, se clasifican de distinta manera. Comúnmente se divide en 4 secciones denominadas *Near Infrared*(NIR) entre los 700 nm y 1000 nm, *Short Wave infrared*(SWIR) entre los 1000 nm y 3000 nm, *Mid Wave Infrared*(MWIR) entre los 3000 nm y 8000 nm y *Far Infrared*(FIR) o a veces denominado *Long Wave Infrared*(LWIR) que está entre los 8000 nm hasta 1 mm. Cada una de estas sub-bandas corresponde a un intervalo de longitudes de onda distinta así como se muestra en la figura 1.5.

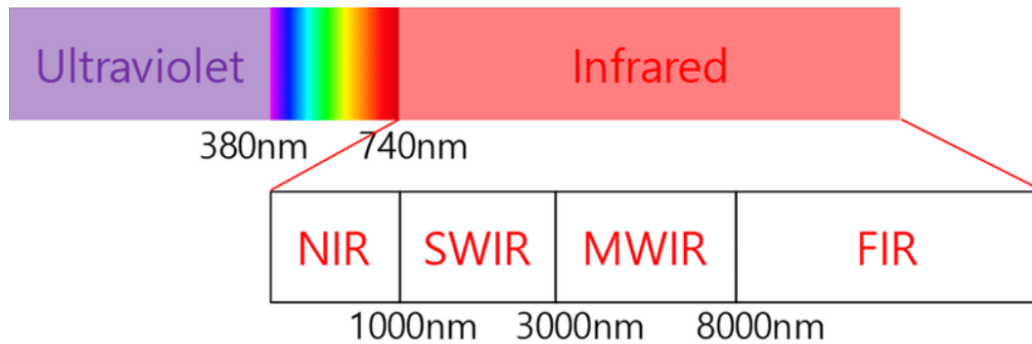


Figura 1.5: Desglose del espectro IR, las secciones corresponden a NIR(*Near Infrared*), SWIR(*Short Wave Infrared*), MWIR(*Mid Wave Infrared*) y LWIR(*Long Wave Infrared*)[50].

La banda NIR se utiliza comúnmente en aplicaciones de agricultura y control de alimentos[51][52]. El SWIR se puede aplicar al análisis del estrés hídrico de plantas o detección de metales preciosos, entre otros[53][54]. el MWIR se ha usado en identificación de materiales de pintura y reconocimiento facial[55][56]. Finalmente, el LWIR se ha empleado en detección de objetos en ambientes complejos como el océano[57] y en rescate de personas por calor corporal en catástrofes naturales[58]. Una diferencia importante en el funcionamiento de cámaras IR es el tipo de radiación que captan. Por un lado, el NIR y SWIR captan reflexiones en una escena, mientras que la tecnología sobre la base de MWIR y LWIR detecta emisividad de los objetos.

La banda SWIR es de especial interés para el desarrollo de investigaciones basándose en estrés de plantas, debido a que las características biológicas de las plantas y los compuestos químicos que emiten bajo estrés presentan características visibles en reflexión. Como el espectro SWIR observa principalmente reflexiones a diferencia del MWIR y el LWIR, se prioriza este tipo de cámaras. Se han realizado ya experimentos aprovechando el espectro SWIR logrando identificar una serie de parámetros y definiendo métricas en la vegetación de manera no invasiva[59-61].

1.3.2 Ruido de patrón fijo (FPN)

El principal problema de las mediciones con cámaras IR y revisión de las imágenes obtenidas es el ruido de una imagen. Esta interferencia es producida por diversos factores que corresponden a los componentes electrónicos de la cámara y a las condiciones bajo las cuales opera. Esto puede generar un desgaste de la imagen substancial, por lo que es necesario preocuparse de como eliminarlo y de identificar correctamente cuál es el tipo de ruido presente. Existen dos tipos de ruido principalmente, los de no uniformidad y los temporales. El primero ocurre debido a la configuración que tienen los sensores en las cámaras IR el cual se denomina *Infrared Focal Plane Array* (IRFPA) donde al ser múltiples detectores dentro del sensor y además al ser utilizada tecnología extremadamente sensible a la radiación IR se produce el fenómeno de diferentes valores detectados entre cada sensor pese a ver una imagen uniforme. Los temporales por otra parte son los que tienen relación con el ruido de disparo y el *flicker noise*. El FPN entra en la categoría de no-uniformidad y se caracteriza en que es estático al ser independiente del tiempo, es por esto que recibe la categoría de patrón fijo.

Dentro de la categoría de no-uniformidad (NU) se tienen dos parámetros los cuales son los que alteran la imagen, el offset y la ganancia de cada detector. El primero corresponde a un valor independiente de la radiación incidente y variable con la temperatura del sensor, mientras que el segundo tiene relación con la diferencia en la conversión de radiación recibida a señal eléctrica. Ambos son diferentes para cada detector del arreglo y por ende para cada pixel, provocando así el FPN.

La sensibilidad del SWIR lo hace susceptible al FPN y entrega imágenes como la de la figura 1.6, donde se aprecian líneas verticales que muestran píxeles con una receptividad distinta y potenciada. Los sensores utilizados ya sean de microbolómetros o de ferroeléctrico basándose en fotodetectores[61] en los distintos espectros en IR fuera del SWIR presentan el ruido de distinta manera, pero aun así la procedencia de estos sigue siendo el hardware utilizado y sus defectos e imperfecciones visibles y diferentes para cada pixel.



Figura 1.6: FPN presente en una cámara Xeva 320 SWIR.

Para combatir los efectos del FPN por lo general se emplean métodos de corrección de offset y ganancia, los cuales buscan compensar y normalizar sus valores a lo largo del arreglo por pixel, a este procedimiento se le denomina *Non Uniformity Correction* o NUC por sus siglas en inglés.

1.4. Plenóptica

Uno de los principales parámetros que se ajustan en una cámara es el foco del lente, lo que conlleva a enfocar o desenfocar objetos en una escena. Si bien este ajuste manual de manera general sirve, en el caso de mediciones precisas o de análisis más exhaustivo, es necesario un método controlado y que permita enfocar todos los objetos presentes. La plenóptica es la captura del campo de luz mediante la toma de imágenes en forma matricial en los ejes X e Y, donde cada imagen de la matriz lleva parte de la información óptica del escenario. Esta información se puede procesar para obtener distintos resultados, entre los cuales destacan el reenfoque digital y la generación de imágenes 3D. Mediante el ingreso de estas imágenes a un algoritmo de reenfoque se genera un arreglo de imágenes en tres dimensiones, donde la tercera dimensión corresponde a la profundidad, obteniéndose así un cubo de información del cual se pueden extraer el plano enfocado de cada objeto de la escena como se muestra en la figura 1.8. Notar que si se mezclan los conceptos de un cubo multiespectral con el de una medición plenóptica se obtiene un cubo de cuatro dimensiones considerando los parámetros eje X, eje Y, longitud de onda y profundidad. Existen diversas maneras de generar una medición plenóptica los tres principales son:

- Arreglo de cámaras
- Una cámara con un arreglo de microlentes.
- Una cámara con un desplazador

Se optó por elegir la toma de muestras mediante una cámara y un desplazador mecánico que permita la captura matricial de imágenes, esto debido al elevado costo que implica tener una cantidad considerable de cámaras en IR y al hecho de que la componente temporal no afecta la posición de los objetos a fotografiar. La plenóptica en sí es afectada principalmente por los siguientes parámetros:

- Milimetrage del lente (zoom)
- Distancia de los objetos a la camara
- Apertura del lente.

Cada uno de estos parámetros afecta lo que se denomina *profundidad de campo*, esto define cuanto de la escena se puede enfocar. La figura 1.7 y 1.8 muestra como afectan estos parámetros la profundidad de campo.

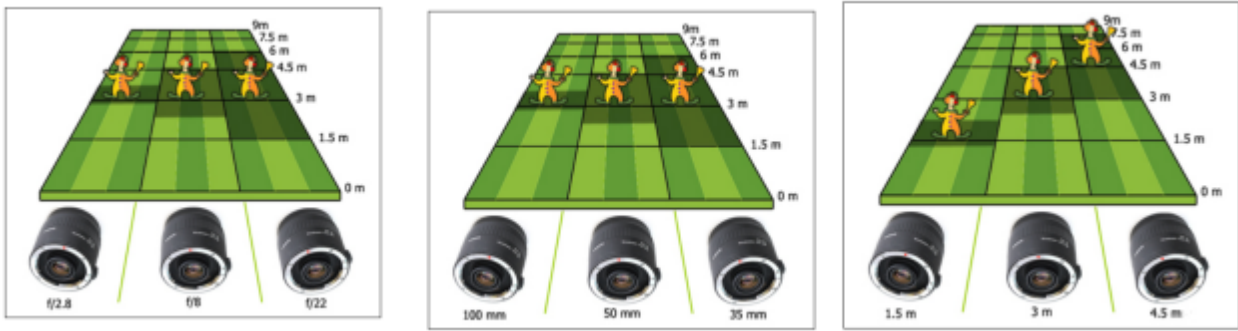


Figura 1.7: Efecto en la profundidad de campo de: (a) Apertura del lente, (b) Milimetrage del lente, (c) Distancia entre cámara y objeto. Cortesía de TLW Photography.

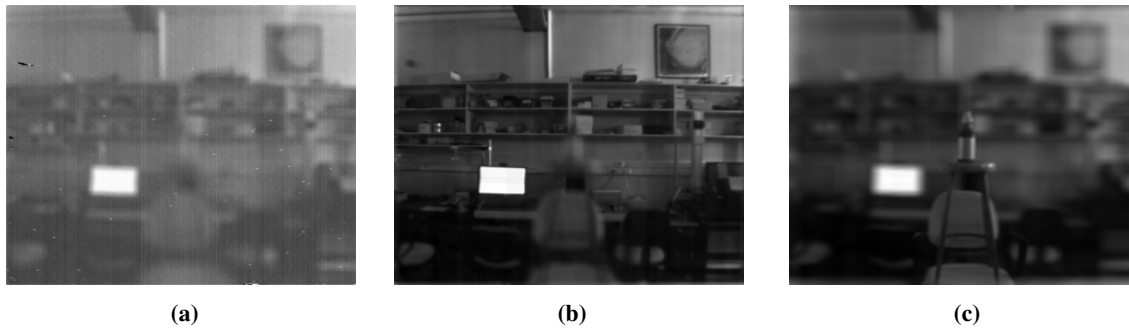


Figura 1.8: de izquierda a derecha el reenfoque se realiza acercándose a la cámara. Las imágenes corresponden a los slides a) 9, b) 54 y c) 134.

Los avances más recientes en este campo se enfocan en la aplicación de esta tecnología en el área comercial y la facilidad de uso para un consumidor, ejemplos de esto son la creación de cámaras plenópticas de mano en el año 2002 por Ren Ng, la venta y comercialización de la primera cámara plenóptica de uso industrial por parte de la empresa Raytrix y posteriormente Lytro ofreciendo la primera cámara plenóptica de uso público no-industrial[62].

1.5. Estado del Arte

1.5.1 Estrés en Plantas en IR

El análisis del estrés en IR de las plantas es un área de recolección de datos moderna y no invasiva en comparación a otras alternativas. Se busca identificar fenómenos visibles en el IR que aporten a informar sobre el estado de salud de la planta y sus necesidades. Si bien como se explicó anteriormente se pueden ver distintas características en las plantas mediante variados métodos, el SWIR ha sido una de las bandas que mejor se relaciona con la vegetación. Por un lado, estudios especializados y específicos se han hecho, como el desarrollado por M. Rodrigues[63], que logra identificar la cantidad de azúcar y nicotina en los distintos tipos de plantas de

tabaco. Mientras que para vegetación en general el SWIR se ha empleado con éxito en detección de estrés producto de insectos[64] o por falta de hidratación[65]. Con el propósito de comprobar el estrés hídrico se vuelve de especial interés el trabajo realizado por Kim D. Zhang[66], donde se realiza un aumento de sensibilidad de los índices preexistentes de detección de agua. Comprobando así que aún hay espacio para mejorar los métodos utilizados actualmente.

Estos resultados son indicadores de que es posible analizar las bandas de interés del estrés hídrico en distintas plantas con gran detalle. Esto proveería información variada sobre distintos tipos de cultivo y sus cualidades.

1.5.2 *Eliminación de FPN*

La eliminación del FPN en el IR ha sido investigada desde distintos ángulos. Técnicas basadas en la electrónica de la cámara se han empleado[67][68]. Así como el uso de algoritmos de procesamiento de imágenes que logran eliminar el ruido[69][70], generalmente probados para una sola banda, ya sea SWIR, MWIR o LWIR. El enfoque de preferir algoritmos tiene la ventaja de poder aplicarse a cualquier cámara y seguir siendo el mismo método, siendo así más versátil y menos costoso que adquirir nuevo hardware. Investigaciones como la de Coelho[71] han sido revolucionarias al desarrollar algoritmos que limpian las imágenes en tiempo real con técnicas de reenfoque. Esto en conjunto al trabajo de Ren Ng[72] permiten la obtención de algoritmos de limpieza eficientes y de costo computacional acortado. Si bien ha sido probado en el LWIR, aún no se ha comprobado su comportamiento en todas las bandas del IR, por lo que la revisión en SWIR se vuelve de gran interés.

1.5.3 *Métricas*

Con el objetivo de identificar cuando una imagen está limpia de ruido, se han utilizado distintas métricas y en variadas ocasiones varias al mismo tiempo. Comúnmente se han empleado métodos basándose en imágenes referenciales[73][74]. Sin embargo, han ido surgiendo nuevas maneras de análisis usando algoritmos sin necesidad de una imagen previa[75][76], eliminando así un requerimiento en el procesamiento de imágenes. Debido a la complejidad de estos métodos, no se han probado en todas las bandas del IR, por lo que su expansión a otros espectros es un campo inexplorado. Relevante resulta el trabajo de A.Jara[77] y el *Roughness Laplacian Pattern* (RLP), donde se implementa una métrica de identificación de FPN además de calcular el *blur* de una imagen. Este resultado ha sido posible aplicarlo en arreglos de distintos puntos focales en el LWIR; sin embargo, su uso en otros espectros como los son el SWIR no se ha revisado.

1.6. Objetivos

1.6.1 *Objetivo General*

Desarrollar un sistema plenóptico SWIR para capturar escenas con objetos vegetales y determinar su estrés hídrico, además de determinar la eficiencia de la eliminación de ruido mediante reenfoque plenóptico. Para esto se utilizarán cubos multiespectrales y métricas para determinar integridad estructural y la imagen con menor *blur* en el objeto de interés (OOI).

1.6.2 *Objetivos específicos*

- Eliminar el ruido de patrón fijo en la cámara utilizando procesamiento plenóptico y de cuerpo negro de manera multiespectral.
- Desarrollar una escena con plantas con variaciones espectrales en la banda SWIR de interés.
- Análisis espectral, estructural y de ruido patrón fijo en los objetos de la escena focalizados de forma plenóptica.

1.6.3 *Alcances y limitaciones*

Debido a la naturaleza de captura de imagen plenóptica no se pueden realizar mediciones a objetos en movimiento o cambiantes en el plazo de tiempo que se demora realizar una medición. A esto se le agrega el hecho de que se utilizarán plantas específicas que no representan el comportamiento de todas las existentes, pero sí entregan resultados que debiesen aplicarse de manera general. Considerar de igual modo que los experimentos fueron realizados en un ambiente controlado en el laboratorio.

2. Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Lightfield y Fourier Slice Photography Theorem

2.1.1 Lightfield

El *lightfield* se puede definir mediante la función plenóptica[78] como el conjunto de rayos de luz que viaja en todas las direcciones a través de cada punto en el espacio 3D desde una perspectiva óptica geométrica. Como es una función que describe un concepto tan general, esta se compone de numerosas variables, dentro de las cuales están las coordenadas (x, y, z) , los ángulos posibles (θ, ϕ) , la longitud de onda (λ) y el tiempo (t) .

$$L(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t) \quad (5)$$

Esta función, si bien posee una descripción completa de una escena, es a su vez difícil de operar y en muchas ocasiones posee variables redundantes que no son necesarias considerar en mediciones donde se cumplan las condiciones. Las simplificaciones posibles a realizar se basan en 2 factores, el primero consiste en que se considera un campo de luz monocromático e invariante en el tiempo, por lo que se eliminan 2 de las variables (λ, t) , el segundo es que se considera un espacio libre para las mediciones asumiendo así que la radiación permanece constante en una línea recta, por lo que una dimensión espacial se vuelve redundante.

Esta reducción a 4 dimensiones fue posteriormente trabajada por M. Levoy [79] redefiniéndola como la intersección de 2 planos ubicados en el sensor y el lente, como se muestra en la figura 2.1. Esto con el objetivo de generar un renderizado de imagen de punto de vista variable a diferencia de los métodos preexistentes. Levoy denominó a este constructo como *light slab*

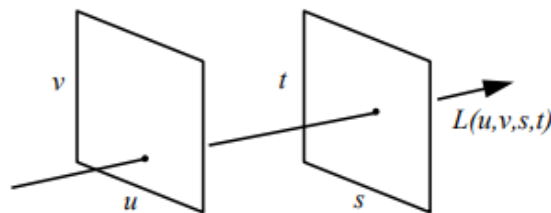


Figura 2.1: Representación visual del *light slab* de M. Levoy. Notar como se definen dos planos.

Posteriormente, el trabajo de Ren Ng[80] define una configuración de los planos tal que se considere $L(x, y, u, v)$, donde un plano se ubica en el sensor y el otro en el lente de la cámara, provocando así que la función describa el interior de la cámara, se aprecia visualmente en la figura 2.2 y es la base para su investigación y creación del *Fourier Slice Photography Theorem*(FSPT).

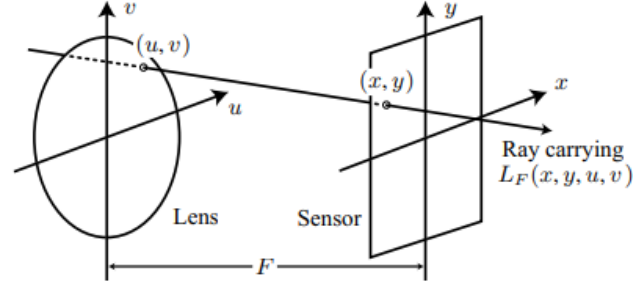


Figura 2.2: Parametrización de Ren Ng del *light slab*. Se define un lente y un sensor.

2.1.2 Operador de fotografía plenóptica

Las parametrizaciones realizadas por Ren Ng tienen como objetivo llegar al *Fourier Slice Photography Theorem* (FSPT), para esto primero se define la generación de imágenes basándose en el campo de luz de las cámaras convencionales y las plenópticas donde las primeras se definen de acuerdo a:

$$E_f(x, y) = \frac{1}{F^2} \int \int L_F(x, y, u, v) du dv \quad (6)$$

Donde E_f corresponde a la irradiancia en (x, y) y F es la separación lente-sensor. La dependencia angular de la fórmula se puede ignorar al ser absorbida por la ecuación del *lightfield*.

Para una cámara plenóptica la captura consta de dos partes: medición y procesamiento. Este tipo de cámara utiliza un sensor plano que provee muestreo direccional de la irradiancia pasando por cada sensor, por lo que si el sensor está a una profundidad F del lente entonces el muestreo será de L_F . El procesamiento de imagen permite utilizar el campo de luz descrito de la cámara convencional para computar la imagen obtenida a cualquier profundidad E'_F , donde F' no tiene que ser igual a F . Para lograr esto se re-parametriza L_F para obtener L'_F de acuerdo a la figura 2.3 y se aplica la ecuación 7

$$\begin{aligned} L'_F(x, y, u, v) &= L_{(\alpha F)}(x, y, u, v) \\ &= L_F(u + (x - u)/\alpha, v + (y - v)/\alpha, u, v) \\ &= L_F(u(1 - 1/\alpha) + x/\alpha, v(1 - 1/\alpha) + y/\alpha, u, v) \end{aligned} \quad (7)$$

De esta manera se puede definir un operador de fotografía el cual se denomina \mathcal{P}_α , que transforma un campo de luz a una profundidad F en una fotografía formada a una profundidad (αF) . Considerando que $\mathcal{P}_\alpha[L_F]$ representa la aplicación de \mathcal{P}_α a un campo de luz L_F , entonces en la ecuación 8 se tiene:

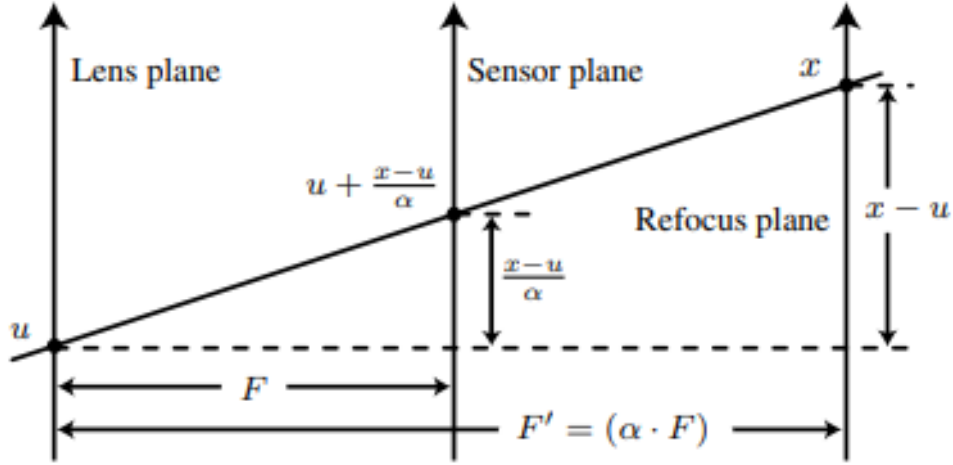


Figura 2.3: Re-parametrización del *lightfield* moviendo el sensor desde F a F'

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_\alpha[L_F](x,y) &= E_{\alpha F}(x,y) \\ &= 1/\alpha^2 F^2 \int \int L_F(u(1-1/\alpha) + x/\alpha, v(1-1/\alpha) + y/\alpha, u, v) du, dv \end{aligned} \quad (8)$$

Esta operación se puede apreciar como cortar un espacio 4D y luego proyectarlo en un plano 2D y permite a su vez calcular fotografías a diferentes profundidades con la medición de un solo campo de luz, convirtiéndolo así en la base de la fotografía plenóptica.

Una vez ya definido el operador de fotografía plenóptica, se lleva al plano de Fourier con el objetivo de llegar al FSPT definido en la ecuación 9. La resolución en detalle de como se obtiene y los beneficios de este se describen en el Anexo.

$$\mathcal{P}_\alpha = \mathcal{F}^{-2} \circ \mathcal{B}_\alpha^{-T} \circ \mathcal{F}^4 \quad (9)$$

La ecuación 9 nos dice que una fotografía es la transformada 2-dimensional inversa de Fourier, de un corte 2-dimensional de la transformada 4-dimensional de Fourier del *light field*.

De esta manera podemos obtener el reenfoque de una escena mediante el uso del plano de Fourier, otorgándonos una mejora en procesamiento de imagen y optimizando los tiempos de cómputo.

2.2. Calibraciones

2.2.1 Calibración de dos puntos con cuerpo negro

La calibración de dos puntos hace uso de un objeto de emisión ideal definido en dos temperaturas para determinar el comportamiento del ruido. Este objeto se denomina cuerpo negro.

El cuerpo negro consiste en una placa o superficie pintada con una sustancia que elimina gran cantidad de las reflexiones en su superficie y emite a una temperatura constante definida por un controlador. Con esto se asegura que la cámara capture principalmente emisión del cuerpo.

Al definirse dos puntos de operación de temperatura, uno puede realizar la eliminación de ruido. De acuerdo al modelo de Perry[81] se caracteriza el arreglo de sensores IR como se muestra en la ecuación 10 para luego llegar al ruido residual en la ecuación 12. La corrección se basa en las variaciones de *offset* y ganancia en los píxeles, por lo que el análisis es pixel a pixel.

$$N_{ij}T_{ij} = R_{ij} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_{ij})n_{ij}(\lambda) d\lambda + D_{ij}. \quad (10)$$

$$R_{ij} = t_{eff}t_{int} \frac{\pi \cos^4(\theta_{ij})}{4(F/\#)^2 + 1} + A_{ij} \quad (11)$$

$$W_{ij}(T_{ij}) = (N_{ij}(T_{cal1})m_{ij} + \langle N_{ij}(T_{cal1}) \rangle) \quad (12)$$

$$m_{ij} = \frac{\langle N_{ij}(T_{cal2}) \rangle - \langle N_{ij}(T_{cal1}) \rangle}{N_{ij}(T_{cal2}) - N_{ij}(T_{cal1})} \quad (13)$$

Donde $L(\lambda, T_{ij})$ es la radiancia espectral de un fotón en la celda (i, j) a temperatura T_{ij} de acuerdo a la ley de Planck. $F/\#$ es la proporción focal de la óptica empleada, t_{eff} es la transmitancia efectiva del sistema óptico, λ_2 es la frecuencia de corte superior, λ_1 es la frecuencia de corte inferior, R_{ij} es el coeficiente de respuesta, θ_{ij} es la diferencia de ángulo del pixel visto desde la salida, D_{ij} es la corriente oscura por tiempo de integración para cada pixel, A_{ij} es el área activa de los píxeles, $n_{ij}(\lambda)$ es la eficiencia cuántica por pixel versus longitud de onda, t_{int} es el tiempo de integración, T_{cal1} es la temperatura de calibración 1, T_{cal2} es la temperatura de calibración 2 y N_{ij} es el *output* de cada píxel.

La resolución de la ecuación anterior para cada uno de los píxeles de la imagen lleva a la generación de una nueva imagen conformada por todos los píxeles corregidos, llegando así a una eliminación efectiva del FPN, como se demuestra a modo de ejemplo en la figura 2.4.

La calibración de dos puntos con un *black body* corresponde a un método de eliminación de FPN compro-

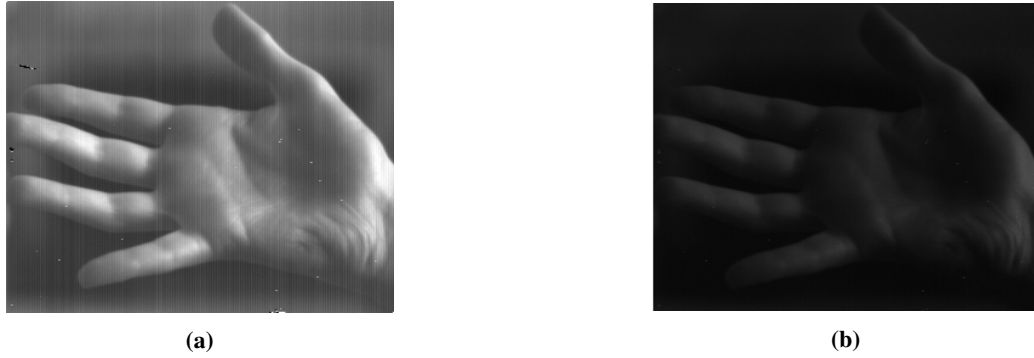


Figura 2.4: Eliminación de FPN en cámara Xeva 320, a) Original, b) Corrección mediante calibración de dos puntos por cuerpo negro utilizando un filtro de 1600. Intervalo 175°C - 200°C.

bado, es decir, la referencia a utilizar cuando se compare con la corrección de ruido mediante otros métodos.

2.2.2 Eliminación mediante plenóptica

Revisando en mayor detalle el par de imágenes de la figura 1.8 correspondientes al reenfoque plenóptico, es posible notar que el FPN se ve severamente atenuado sin necesidad de una calibración con cuerpo negro. El resultado anteriormente descrito corresponde al desarrollo de una teoría puesta a prueba por Coelho explicada anteriormente, en la cual revisa el concepto del FPN en el LWIR y lo reconsidera, pero esta vez como un objeto ubicado en el infinito, así como se muestra en la figura 2.5. Esto en el ámbito de una medición plenóptica significa que el reenfoque de la escena por sí sola va a eliminar el ruido de patrón fijo mediante el desenfoque de este. Es decir, se realiza un desenfoque del ruido mientras el foco se va aproximando al sensor generando así imágenes corregidas. La aplicación de esta idea y algoritmo en otras bandas corresponde a uno de los resultados de esta investigación.

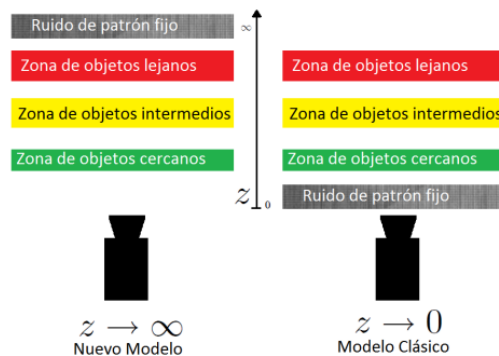


Figura 2.5: Modelo de ruido ubicado en el infinito óptico desarrollado por Coelho. El cambio corresponde a uno de concepto que permite mirar desde otro punto de vista la problemática. Imagen cortesía de Coelho [71].

Es necesario notar, sin embargo, que el costo de utilizar un método como este implica perder nitidez y definición en la imagen, lo cual dependiendo de la aplicación puede tener mayor o menor incidencia en los resultados.

2.3. Métricas

2.3.1 *Image Quality Index*

Al observar una imagen la percepción que se tiene de esta es diferente dependiendo de la persona que la esté observando. Es por esto que si bien se puede decir en términos generales si una imagen está con ruido o si está enfocada, es impreciso y poco confiable si se desea determinar precisamente sus características. Debido a la limitación humana mencionada, se hace necesario poseer métricas que trabajen con los valores que entrega la captura de una imagen, con el fin de determinar bajo un algoritmo objetivo cuál es el grado de nitidez y limpieza con el que cuenta una captura.

No ha existido un desarrollo profundo de los índices de calidad de imágenes en el IR y los utilizados se basan principalmente en utilizar una referencia con el fin de capturar las diferencias existentes entre esta y la escena tomada. Todas estas técnicas fueron desarrolladas principalmente para el espectro visible, luego se hace imperativo utilizar una metodología diseñada para el IR y prescindir de una imagen referencial con el objetivo de minimizar así los requisitos para determinar el ruido y desenfoque.

Para el presente trabajo se optó por utilizar dos métricas relacionadas con la determinación de FPN, *blur* y similitud de imágenes. Para comparar la similitud entre imágenes se utilizará el *structural similarity index measure* (SSIM) la cual revisa la integridad estructural de una imagen y basándose en eso determina su similitud a la imagen original, entregando un valor entre 0 y 1, donde 1 es imágenes iguales y 0 son imágenes totalmente diferentes. Para efectos de *blur* y FPN se usará el RLP desarrollado por A. Jara, el cual consta de determinar simultáneamente el ruido y el desenfoque sin utilizar una imagen de referencia en el IR. Ambos métodos permiten comprobar de manera objetiva la proporción de ruido, *blur* y la similitud entre imágenes, estableciendo así un *Image Quality Index* con el cual trabajar.

2.3.2 Roughness Laplacian Pattern Index

Con el fin de explicar los resultados entregados por el RLP, se aplicará a una escena conformada por una botella definida como *Object of interest* (OOI). Se aplica entonces la métrica en la cual se requiere que el usuario ingrese valores de operación, estos valores son alterables según acomode al usuario. Para los propósitos que la utilizaremos se definen los valores σ , w y α en la tabla 1. Al ser un método libre de imagen de referencia no es necesario poseer una imagen base para comparar los resultados obtenidos, esto facilita el uso y permite prescindir de esta necesidad.

Slide	Blur($\sigma = 5, w = 3$)	FPN($\alpha = 1$)
25	0.94025	0.07452
50	0.93816	0.06546
75	0.92761	0.07371
100	0.92039	0.08027
125	0.91940	0.07734
150	0.91705	0.07853
175	0.94107	0.06706
200	0.95481	0.05883
225	0.95755	0.05492
250	0.95928	0.05460

Cuadro 1: Comparación de cambios de *blur* y FPN a lo largo del eje z

Entre mayor sean los valores de las columnas de *blur* y FPN, mayor es su presencia en el OOI, si bien las variaciones parecen de carácter pequeño, la más mínima alteración posee gran significancia en términos de calidad de imagen. La figura 2.6 muestra gráficamente como va variando el valor del OOI. Con el fin de identificar el *slide* donde el objeto está mejor enfocado, se requiere analizar donde el *blur* tenga su valor más bajo y donde el FPN tenga su valor más alto posterior a los *slides* iniciales, donde el ruido es el máximo en el infinito.

A medida que se re-enfoca la imagen el ruido se desenfoca y se elimina, se produce también un aumento de *blur* en el OOI, pues aún no se re-enfoca el objeto deseado. Cuanto más se acerca a este, el valor de *blur* disminuye como es lo esperado, pero, sin embargo, se aprecia que el FPN aumenta levemente. La explicación de esto es que al obtener mayor detalle en la imagen, el algoritmo identifica eso como ruido e indica que la imagen posee un *peak* local de FPN.

Como nos interesa simplemente ubicar donde está enfocada el OOI dentro de la sucesión de imágenes, nos enfocamos en el valor mínimo del *blur* posterior a los *slides* iniciales. Se obtiene de este modo que el OOI estará con el enfoque óptimo en el *slide* 137. En la figura 2.7 se elige una *Región of interest*(ROI) ubicada espacialmente en el fondo con el fin de comprobar el comportamiento de reenfoque plenóptico, logrando apreciarse el

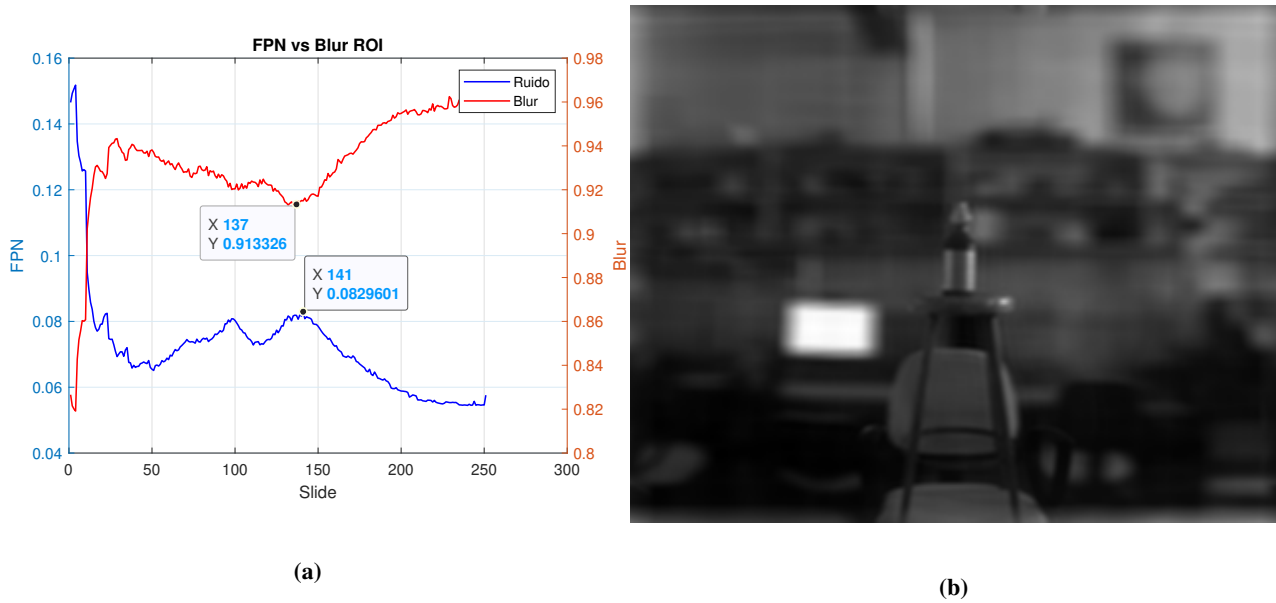


Figura 2.6: (a)Gráfico de *blur* y FPN a lo largo de los distintos *slides*, (b) Slide 137, el cual corresponde al de menor *blur* en el OOI.

fenómeno de aumento de *blur* consistente que va reemplazando al FPN en el punto más lejano de la escena. Los máximos y mínimos valores tanto de *blur* como de FPN son definidos por los parámetros del algoritmo. En el caso actual el máximo valor de *blur* corresponde a 0.96 y el mínimo a 0.06, en cuanto al FPN el máximo es 0.15 y el mínimo 0.06.

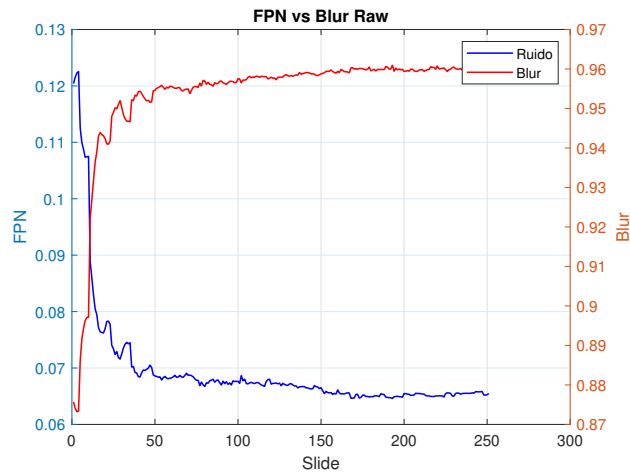


Figura 2.7: *Blur* y FPN de fondo en una medición plenóptica, dependiendo del tipo de ruido, profundidad de campo y factores de la escena, puede ser necesario utilizar valores distintos para los parámetros del algoritmo.

2.3.3 SSIM

El SSIM corresponde a un método de análisis estructural de imágenes el cual surgió como una mejora al RMSE[82] y ha sido alabado como un método fiable para los casos generales de distorsión de imágenes. Es por esto que si se desea comprobar la validez de un método de eliminación nuevo, se emplea para comparar una imagen corregida con un método comprobado con el nuevo método. El rango del SSIM es entre 0 y 1 siendo el 0 para imágenes totalmente distintas y el 1 para imágenes iguales. la figura 2.8 muestra la aplicación del SSIM para una imagen con leves diferencias, mientras que la figura 2.9 muestra una alteración mayor de la imagen original.



Figura 2.8: (a) Imagen original limpia, cortesía de MATLAB. (b) Imagen alterada con un filtro de desenfoque.

El SSIM de la figura 2.8 es de 0.9407, lo que indica que son 94% iguales. Visualmente, es fácil ver que la distorsión producto del desenfoque utilizado no es una alteración mayor, sin embargo, para otros fenómenos como ruido gaussiano que altera fuertemente la imagen, el valor del SSIM será considerablemente menor. Como se ve en la figura 2.9, donde el valor del SSIM es 0.1616.



Figura 2.9: (a) Imagen original limpia, cortesía de MATLAB. (b) Imagen alterada con ruido gaussiano añadido.

3. Capítulo 3: Set-up experimental

3.1. Escena propuesta

3.1.1 Calibración

En el caso de la calibración utilizada en esta investigación, se optó por utilizar una regresión lineal entre dos puntos de temperatura con el fin de realizar la calibración de dos puntos. Para efectos de obtener mayor precisión, se trabajó por intervalos de temperatura dentro de los siguientes rangos:

- 100 °C a 125 °C
- 125 °C a 150 °C
- 150 °C a 175 °C
- 175 °C a 200 °C

El método entrega como resultado los valores de pendiente e intersección con el eje Y por pixel, los que corresponden a ganancia y offset por pixel de una imagen de acuerdo a la ecuación 14.

$$Xr_i = X_i G_i + O_i \quad (14)$$

Donde Xr_i es el pixel de la imagen con ruido, X_i es el pixel de la imagen sin ruido y G_i, O_i corresponden a la ganancia y offset por pixel. Luego al obtener la ganancia y offset de cada pixel mediante la resolución de la ecuación de la recta se puede eliminar el ruido y obtener la imagen limpia reordenando y generando la ecuación 15.

$$X_i = \frac{Xr_i - O_i}{G_i} \quad (15)$$

3.2. FPN y cuerpo negro en el espectro

3.2.1 Parámetros y condiciones

Para poder eliminar el FPN de una imagen mediante un cuerpo negro es necesario en primera instancia armar una configuración como la vista en la figura 3.1, donde se coloca la cámara apuntando a la superficie de emisión del cuerpo negro.

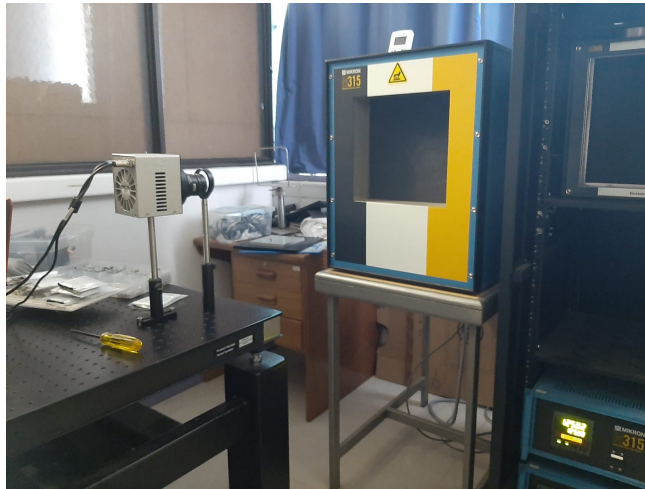


Figura 3.1: *setup* de medición con cuerpo negro. Se utiliza una cámara Xeva 320 SWIR y un cuerpo negro con un rango de 100 °C-400°C.

Los valores de temperatura son claves en la corrección de imagen, ya que establecen los valores de ganancia y offset que se obtendrán para la eliminación de FPN. A modo de ejemplo se muestran las imágenes de cuerpo negro a continuación a distintas temperaturas

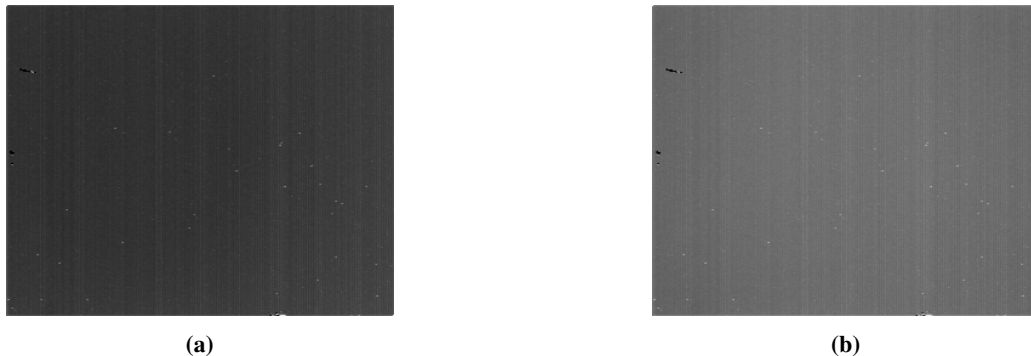


Figura 3.2: Cuerpo negro a distintas temperaturas, a) 100 °C, b) 200 °C (utilizando un filtro de 1600 nm). Se logra apreciar que la intensidad de pixel en la imagen va en aumento a medida que se utilizan temperaturas más altas.

El comportamiento descrito en la 3.2 corresponde con la ley de desplazamiento de Wien la cual establece el *peak* de un cuerpo de emisividad perfecta como un valor dependiente de la temperatura. El espectro SWIR requiere de objetos a temperaturas de 175 °C y más para empezar a captar su radiación como emisividad,

por lo que no se espera obtener resultados prometedores al realizar limpieza de ruido utilizando los valores determinados en las franjas de 100 °C a 125 °C y 125 °C a 150 °C. Esto en contraste a la enorme diferencia de intensidad entre 150° a 175° C o de 175 °C a 200 °C lo que conlleva a una mejor eliminación de FPN y sigue la idea de calibración de dos puntos de utilizar extremos claramente distintos en cada punto de calibración.

3.2.2 Cuantización del FPN a lo largo de espectro

Con el objetivo de realizar la eliminación para distintas temperaturas y distintas longitudes de onda, se procede a revisar los valores de ganancia y *offset* obtenidos de la ecuación 14 a lo largo del espectro SWIR de la cámara utilizada, es decir, entre 1080 nm y 1700 nm. Las figuras 3.3 y 3.4 dan cuenta del comportamiento de la ganancia y *offset* de varios píxeles en un rango de temperatura fija y luego el análisis de uno solo de esos píxeles a distintas temperaturas.

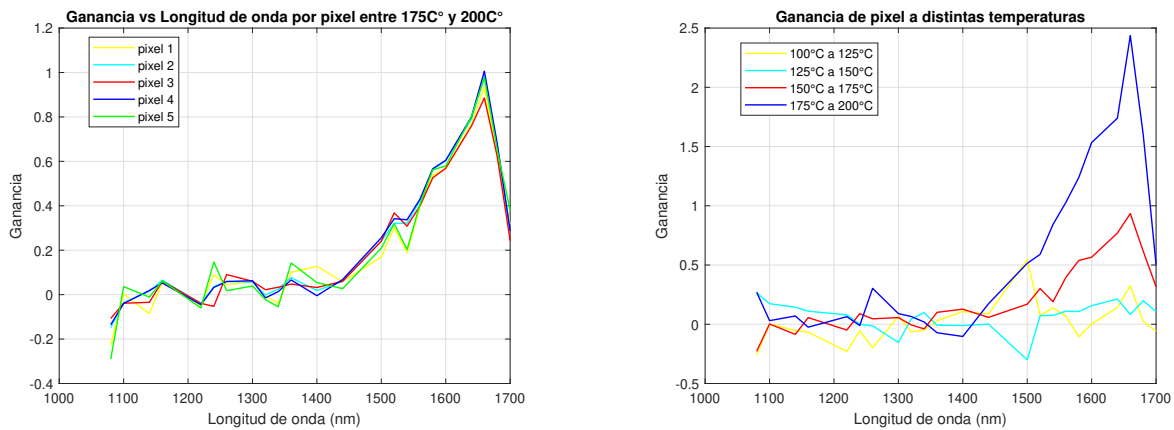


Figura 3.3: A la izquierda el comportamiento de ganancia a lo largo del espectro de varios píxeles con temperatura fija, a la derecha el comportamiento de un solo pixel (pixel 4) a distintas temperaturas.

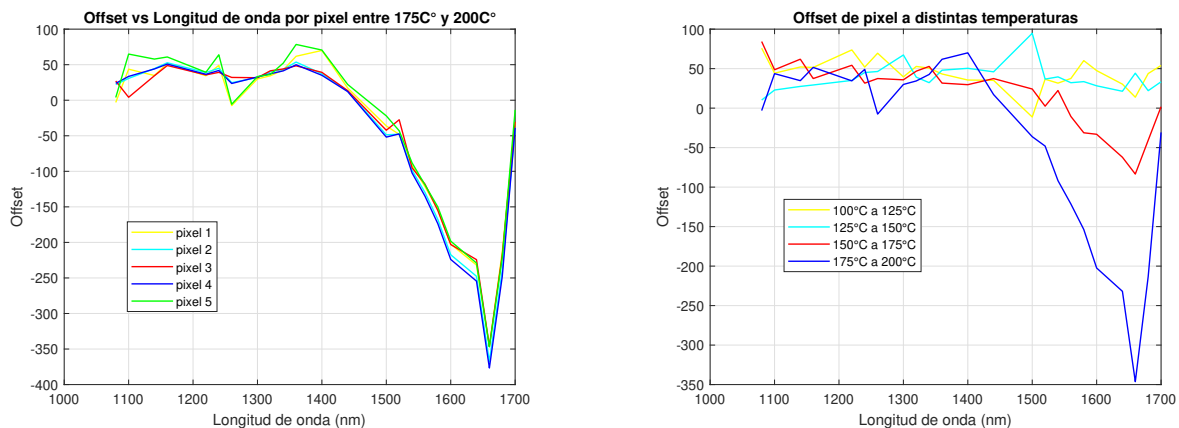


Figura 3.4: A la izquierda el comportamiento de *offset* a lo largo del espectro de varios píxeles con temperatura fija, a la derecha el comportamiento de un solo pixel (pixel 4) a distintas temperaturas.

Estos resultados indican que los valores más altos de ganancia se obtienen cerca de los 1660 nm a la vez que su contraparte *offset* disminuye al mínimo en esa longitud de onda. En la figura se nota que va variando en intensidad la ganancia y *offset* de cada pixel de manera distinta, mostrando así que el FPN es distinto para cada pixel de la imagen, siempre que no sea uno saturado o muerto. Luego, para comparar a lo largo del rango de temperaturas medidas su comportamiento, se analiza un pixel solamente. Dadas las características de una ecuación de la recta, es lógico determinar que a mayor inclinación (ganancia) se obtiene un punto de intersección más bajo (*offset*). Para la mayor efectividad posible en la eliminación de ruido se recurre a los valores de ganancia más altos y los valores de *offset* más bajos, ya que esto indica una diferencia mayor entre punto inicial de calibración y punto final, lo que es beneficioso para el método de dos puntos. Por prueba con imágenes se determinó que el rango aceptable es el intervalo entre 1600 y 1680.

Con un rango ya definido y acotado, determinar la responsividad de la cámara a distintas temperaturas se realiza mediante una regresión lineal entre las intensidades promedio de pixel. Para esto también se incluyó la eliminación de ruido temporal tomando un video de 100 *frames* del cuerpo negro en cada medición. Al ser promediados los *frames* se elimina la componente temporal a cada temperatura, luego promediando la intensidad de todos los píxeles a las temperaturas correspondientes se obtiene una curva de comportamiento. El procedimiento fue realizado para 24 filtros en total, de manera que se genera una respuesta multiespectral, con la cual se procede después a generar una eliminación de ruido en un amplio rango espectral. En la figura 3.5 se observa como varía la intensidad de pixel a medida que la temperatura va subiendo usando 2 filtros distintos. Notar como dependiendo del filtro utilizado, la intensidad promedio de pixel tomará formas distintas.

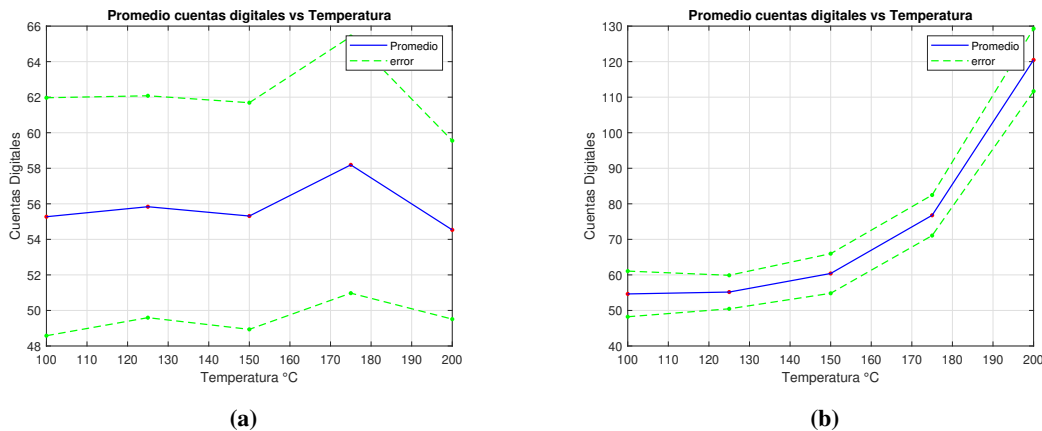


Figura 3.5: Promedio de cuentas digitales con: a) 1360 nm, b) 1680 nm. Es posible distinguir que la temperatura posee distintas pendientes dependiendo del tramo que se revise, notándose que el tramo 175 °C a 200 °C es el de mayor pendiente.

Con el objetivo de limpiar la imagen es necesario utilizar una ganancia positiva y un offset negativo en el tramo analizado. En caso contrario, los resultados de la limpieza son erráticos y subóptimos, como se muestra cuando se usa un filtro de 1360 nm. La calidad de la imagen obtenida varía enormemente al utilizar un filtro incorrecto, por lo que un parámetro a seguir corresponde a la variación de intensidad de pixel y que cumpla con las características necesarias de la calibración de dos puntos. Ejemplos de como varía la corrección en la figura 3.6.

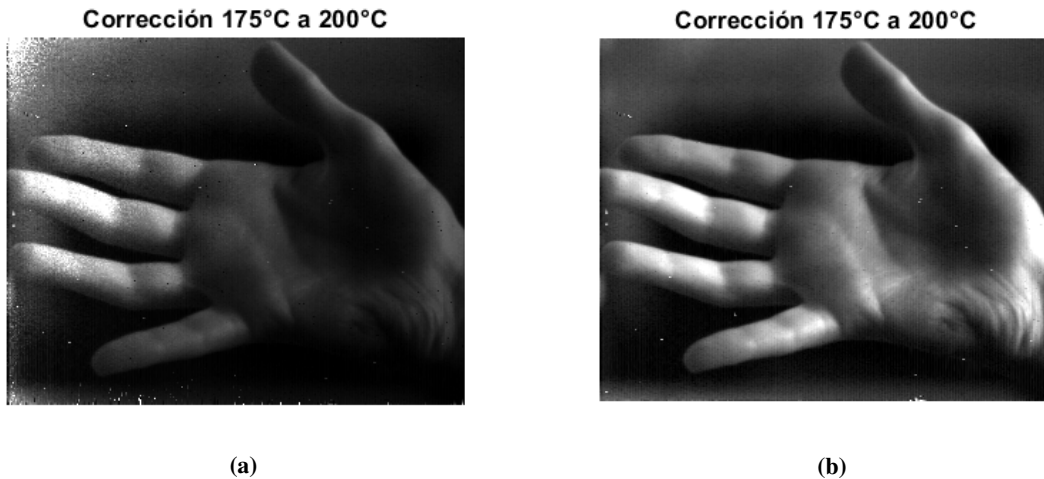


Figura 3.6: La aplicación de la corrección en el tramo 175°C a 200°C para a) 1360 nm. b) 1680 nm.

Como se había mencionado anteriormente, se prioriza utilizar los tramos donde la diferencia entre los extremos del intervalo es la mayor, implicando así una mayor ganancia y un menor offset, por ende obteniendo una mejor eliminación de ruido.

Las imágenes obtenidas entregan como resultado lo efectiva que puede ser el método de calibración de dos puntos siempre y cuando se consideren los intervalos adecuados, tanto en longitud de onda como en temperaturas utilizadas. En el anexo se entregan los resultados obtenidos con los demás filtros y el lector podrá revisar los otros espectros probados. Donde se apreciará que los filtros bajo 1600 no proveen una limpieza satisfactoria siguiendo su curva de temperatura. Las imágenes con corrección de dos puntos serán utilizadas como imágenes de referencia para compararlas con el método de eliminación de ruido mediante reenfoque.

3.3. Equipo y Escena

3.3.1 Equipo

La escena propuesta comprende el uso del desplazador mecánico *Newport* en la figura 3.7 programado mediante LabView y una cámara Xeva 320 montada en este junto a una montura de filtros. La cámara posee una eficiencia cuántica como se muestra en la figura 3.8, teniendo un rango de operación entre los 900 nm y los 1700 nm. El lente utilizado fue uno de 50 mm con una apertura de 4/f y todas las mediciones utilizaron un tiempo de integración de 100000 ms. Se requirió además una lámpara halógena con emisión en el infrarrojo controlada como la mostrada en la figura 3.9 junto a su controlador. Para la construcción del cubo multispectral se utilizaron 24 filtros de la banda SWIR con un valor mínimo de 1080 nm y un máximo de 1700 nm.

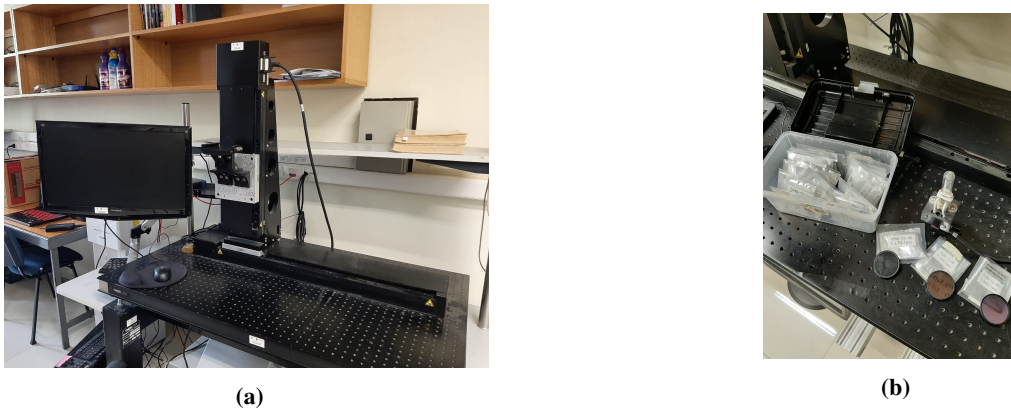


Figura 3.7: (a) Desplazador y computador utilizado (b) Filtros utilizados en la montura.

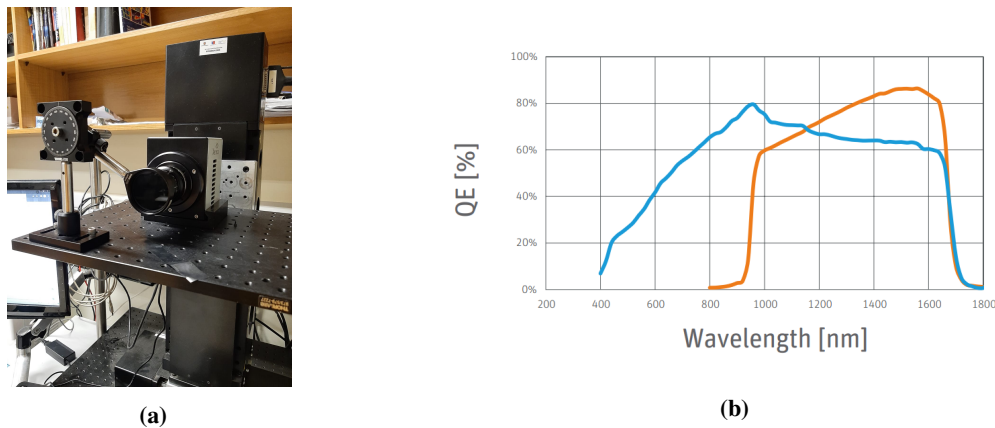
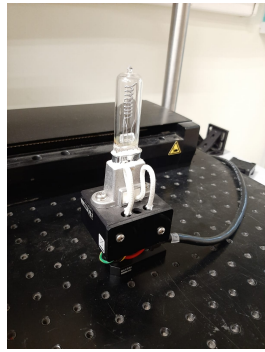


Figura 3.8: (a) Cámara Xeva 320 con montura de filtro (b) *Quantum Efficiency* (QE) a lo largo del espectro, cortesía de Xenics. Notar el peak de eficiencia se produce cerca de los 1600 y presenta valores bajos antes de los 1000 nm y en los 1700 nm.



(a)



(b)

Figura 3.9: (a) luz halógena utilizada, (b) Controlador de la luz halógena. Se establece un valor constante que ilumine la escena con el cual se puede asegurar condiciones de iluminación estables en el experimento.

3.3.2 Escena

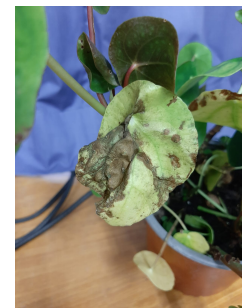
Se optó por aplicarlas a vegetación y análisis de estrés hídrico. La variedad de filtros disponibles para el SWIR otorgan una ventana de aplicación para determinar las diferencias entre hojas secas y hojas con suficiente cantidad de líquido. Las plantas a utilizar corresponden a *Pilea Peperomioides*, una planta de interior de fácil cuidado de la categoría *Herbácea Perenne*. La planta y sus hojas corresponden a la de la figura 3.10.



(a)



(b)



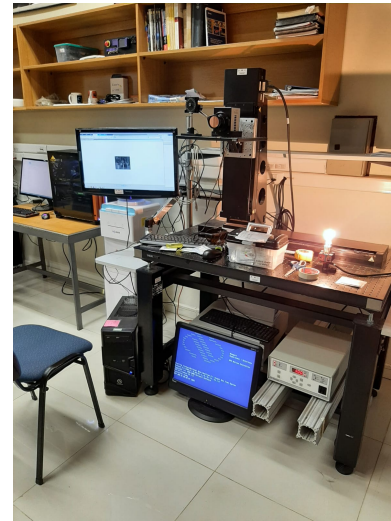
(c)

Figura 3.10: a) *Pilea Peperomioides*, b) Hoja saludable, c) Hoja en evidente estrés hídrico.

Se utilizan dos plantas ubicadas una detrás de la otra, como se muestra en la figura 3.11. Se arma una escena donde la fuente de luz refleja directamente en las plantas y no directamente en la cámara y se posicionan a una distancia de la cámara de 2.70 m y 2.50 m cada planta. la matriz generada por la toma de muestras del desplazador debe contener al OOI, en este caso las hojas de la planta, dentro del *Field of View* (FOV) de la cámara en todo momento y en foco. Como se está utilizando un lente de mayor zoom en comparación al reenfoque de la botella en el capítulo anterior, las plantas deben estar considerablemente más apegadas entre ellas. Finalmente, la escena generada se muestra en la figura 3.12.



(a)



(b)

Figura 3.11: (a) Plantas iluminadas ubicadas ambas en el FOV de la cámara, (b) Cámara y desplazador mecánico junto a luz halógena.



Figura 3.12: Escena completa, plantas están ubicadas a las distancias descritas anteriormente y la luz externa es eliminada mediante las cortinas en las ventanas.

Las matrices generadas fueron de 10×10 con 1 mm de separación entre cuadro. Esto se realizó para cada uno de los filtros empleados y posteriormente se ingresaron al algoritmo de reenfoque. El algoritmo de reenfoque generó un total de 250 *slides*, donde 0 es la más lejana y 250 corresponde a la más cercana.

3.4. Resultados

3.4.1 FPN y plenóptica

Se compararon dos mediciones plenópticas de la misma escena. Una de estas corresponde a imágenes con ruido presente, el cual fue eliminado solamente con plenóptica, la otra corresponde a imágenes limpiadas mediante la calibración de dos puntos y luego re-enfocadas plenópticamente. El objetivo es analizar la similitud de ambos métodos de eliminación y comprobar que la eliminación con solamente plenóptica es igual de eficaz que la eliminación mediante dos puntos bajo el mismo escenario de reenfoque. En la figura 3.13 el SSIM llega a valores cercanos a 0.9 para la escena completa y a 0.95 para un OOI cualesquiera. Los resultados obtenidos permiten comprobar la eficacia del método plenóptico en comparación a la calibración de dos puntos, permitiendo así en sucesivas mediciones obtener resultados igualmente efectivos sin la necesidad de utilizar calibración mediante cuerpo negro.

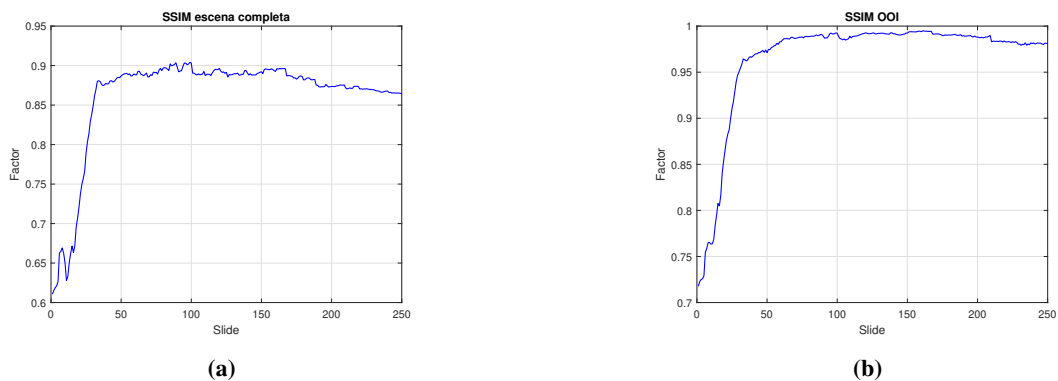


Figura 3.13: Gráfica con los valores de SSIM entre imágenes con corrección mediante reenfoque plenóptico y reenfoque con calibración de dos puntos (a) Escena completa, (b) OOI.

3.4.2 Plano focal

Una vez comprobada la eficacia de la limpieza mediante reenfoque, se procede a revisar cuál de los planos z corresponde al de mejor enfoque de la planta y sus hojas. El lente utilizado provee un menor *Depth of Field* a cambio de un mayor zoom de los objetos, que es necesario para el análisis de un objeto de menor tamaño como son las hojas de una planta. Esto produce que ambas plantas logran estar en foco en el mismo *slide* al ser re-enfocadas. Por lo que cualquier OOI que se elija en la escena se comporta de la misma forma en cuanto a reenfoque. Ejemplo de esto en la figura 3.14.



Figura 3.14: Plantas re-enfocadas en el SWIR. De izquierda a derecha se muestra como el reenfoque va limpiando de ruido la escena hasta eliminar el ruido y enfocar las plantas.

De acuerdo la literatura [83] la absorción del agua debiese de darse principalmente en las bandas cercanas a los 1400 nm, en esta porción del espectro las zonas de mayor intensidad de pixel son de menor cantidad de agua y por ende mayor estrés hídrico en la hoja. El primer OOI (OOI1) es una hoja en evidente estrés hídrico y se presenta delimitada en rojo en la figura 3.15, mientras que los recuadros azules sin nombre corresponden a las otras hojas en evidente deterioro en la escena. Es importante destacar que fuera de las áreas señaladas existen hojas con intensidades de pixel altas, pese a no apreciarse desgaste en ellas en el espectro visible. Estas hojas poseen un cierto nivel de estrés que al no ser comparables visualmente requieren de un análisis de peso turgente y otros parámetros que escapan los alcances de esta investigación, es por esto que no se consideran en el análisis realizado.

El segundo OOI (OOI2) es una hoja sin estrés hídrico en el mismo plano focal delimitada por un cuadrado verde. se utiliza esta segunda hoja para comparar el efecto de la falta de agua y las variaciones que produce desde un estado saludable de la hoja a una de mayor deterioro.



Figura 3.15: (a) Planta en el espectro visible (b) Planta en el SWIR en la banda 1400 nm. En el SWIR se distingue claramente como la mayor intensidad de pixel está asociado con un mayor deterioro de la hoja, mientras que las hojas de menor intensidad se relacionan con un menor estrés hídrico. Esto independiente de la coloración amarilla o verde de la hoja en el espectro visible.

3.4.3 Blur y enfoque óptimo

Con el fin de revisar la calidad de la imagen obtenida se define un *Object of Interest* (OOI) primero en el cual se analizó como van variando los parámetros de FPN y *blur* a lo largo del reenfoque. El OOI corresponde a la hoja estresada, como está ubicada en el mismo plano focal que la no estresada, entonces se puede analizar en el mismo plano z ambas. Se revisan los 250 *slides* creados, donde el 0 corresponde a la imagen con el foco más lejano, mientras que el 250 a la imagen con el foco más cercano.

El análisis multispectral entregó que el algoritmo de detección de foco óptimo es dependiente de la banda que se esté revisando. Esto es producto de la mejora en la detección entre zona hidratada y zona seca en la hoja, lo que aumenta la definición de la imagen a los ojos del algoritmo. A modo de comparación se revisa para el uso de un filtro de 1080 nm y de 1500 nm en la figura 3.16, notándose la gran diferencia que tiene la elección del filtro. En el anexo se adjunta la revisión hecha con cada filtro utilizado y se puede apreciar como van variando las intensidades de nitidez detectadas.

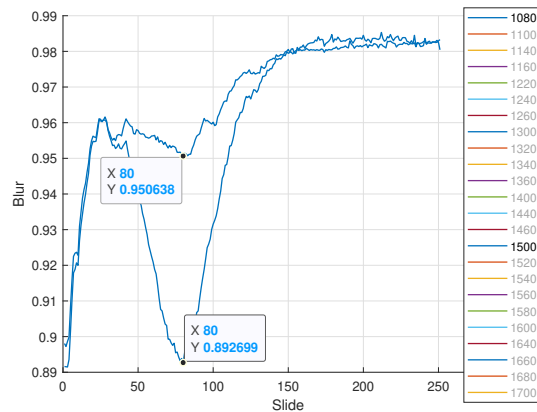


Figura 3.16: Comparación entre el filtro de 1080 nm y el de 1500 nm. Si bien ambos identifican el mismo *slide* como el de óptimo enfoque, difieren enormemente en determinar el grado de nitidez de la imagen elegida, donde la de menor variación corresponde a la de 1080 nm, mientras que la de mayor variación es la de 1500 nm.

Como la banda de interés de 1400 nm a 1500 nm es la misma que la banda de mayor grado de nitidez de acuerdo al algoritmo, se puede decir que la determinación del plano z óptimo mediante la técnica empleada funciona de manera adecuada para el análisis SWIR de la planta estudiada.

Debido a las características de la escena donde los OOI abarcan la mayor parte de esta, el realizar *Focus Stacking*[84] u otra técnica de reenfoque total de imagen pierde utilidad y no aporta en gran medida a los resultados obtenidos. Por lo anterior es que no se realiza para las imágenes con plantas.

3.4.4 Estrés en el espectro

Si bien la literatura entrega como bandas de interés para el estrés hídrico el intervalo entre 1400 nm a 1500 nm, se vuelve necesario volver a realizar un análisis espectral debido al uso de una planta sin estudios previos. Sin embargo, se parte de la base que cercano a los 1400 nm y 1500 nm se deberían obtener buenos resultados, por lo que se genera un cubo multispectral teniendo en cuenta que las bandas de interés son las cercanas a estos valores.

La gráfica de la figura 3.17 da cuenta del comportamiento a lo largo del espectro del OOI1 junto al OOI2. Se muestra como una hoja seca se separa de la hoja hidratada en la reflectividad a medida que se acerca a la banda de los 1400 nm. La hoja seca presenta una reflectividad de un 24.3% de intensidad de pixel en comparación al 14.9% de la hoja hidratada en los 1460 nm, correspondientes al filtro que presenta la mayor diferencia de intensidad en el gráfico. Si consideramos un 9% de aumento en reflectividad como lo mínimo necesario para distinguir una hoja con estrés hídrico de una saludable, se definen los valores entre los 1440 nm y los 1500 nm como los que satisfacen esta condición. El resultado anterior define entonces que la banda de interés para la detección de estrés hídrico de esta planta es entre los 1440 nm y los 1500 nm.

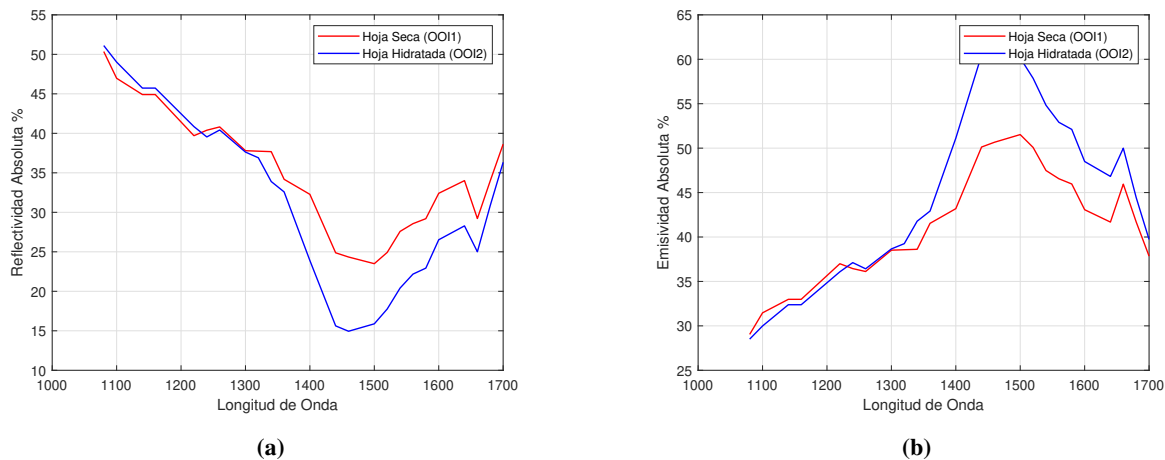


Figura 3.17: (a) Reflectividad absoluta porcentual de una hoja hidratada comparada a una hoja estresada hídricamente (b) Emisividad porcentual de ambos OOI. Notar como la emisividad (y por ende absorbancia) y la reflectancia son inversamente proporcionales.

Luego en la figura 3.18 se presentan imágenes de como se ven las hojas utilizando el filtro de 1460 nm, donde visualmente se puede apreciar claramente las diferencias entre secciones secas e hidratadas de cada hoja. Se incluye además un histograma del OOI1 y OOI2 en la figura 3.19 a fin de comprobar que efectivamente su distribución es notoriamente diferente.



Figura 3.18: Escena bajo un filtro de 1460 nm, considerado el filtro que presenta el mayor contraste para identificar estrés hídrico. Notar como es visiblemente notoria la diferencia entre una zona seca y una hidratada en cada hoja.

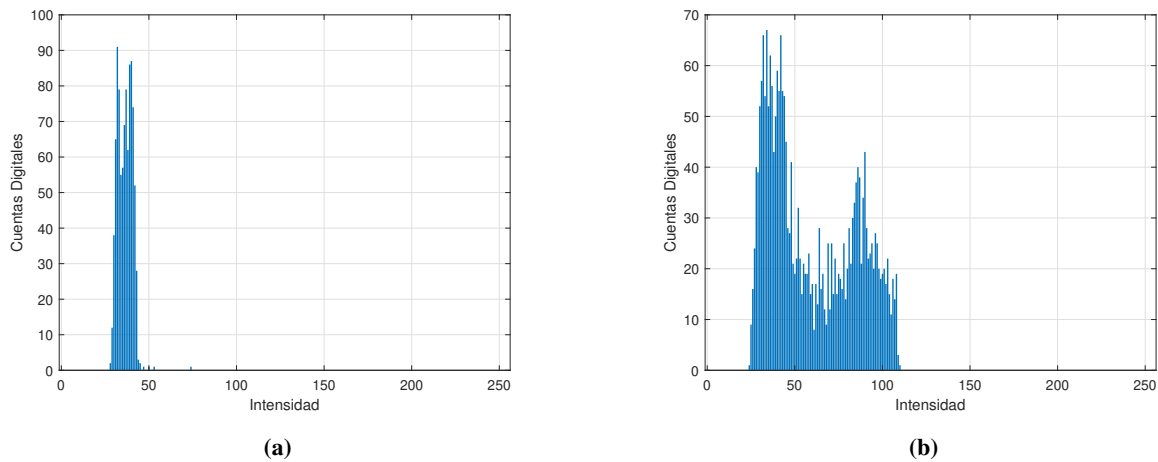


Figura 3.19: (a) Cuentas digitales de hoja sin estrés hídrico (b) Cuentas digitales de hoja con estrés hídrico. La distribución de cuentas digitales en la hoja seca se aglomera en 2 *peaks* distintos en intensidad, a diferencia de la hoja saludable, donde se aprecia un único *peak*. Esto muestra la presencia de 2 zonas distintas en la hoja seca que corresponden a zonas deshidratadas y a zonas saludables.

Una baja reflectancia para el caso analizado implica una alta emisividad que a su vez indica una alta absorbancia. Para las hojas analizadas la principal diferencia entre ellas es el nivel de agua en ellas, donde si se compara los gráficos obtenidos con el comportamiento espectral del agua en SWIR [85] se observa que la curva presenta el mismo comportamiento.

3.5. Discusión y Conclusiones

3.5.1 Resultados

Los resultados de esta investigación engloban principalmente el procesamiento de imágenes en IR con el fin de obtener mediciones sin ruido multiespectrales. Esto es luego aplicado a una escena de interés en el SWIR como lo es el estrés hídrico en las plantas. La investigación comenzó con una calibración de dos puntos mediante el uso de un cuerpo negro y filtros que generan el cubo multiespectral. con esto se caracteriza el FPN identificando su ganancia y offset en el IRFPA obteniéndose así los valores necesarios para realizar la limpieza de la imagen a lo largo del espectro. Sin embargo, el objetivo de dicha eliminación fue establecer un resultado base comprobado con el cual comparar la eliminación de ruido mediante un reenfoque plenóptico basado en el análisis del campo de luz. Esto permitió realizar la eliminación de FPN en tiempo real sin necesidad de detener la toma de muestras o de utilizar un cuerpo negro, lo que otorga una herramienta poderosa de procesamiento de imagen a tener en cuenta. este método fue comparado con la calibración de dos puntos utilizando cuerpo negro, dándole solidez a las mediciones realizadas al obtenerse que el SSIM indicaba una similitud del 99% en ambos procesos. Se logró obtener el comportamiento multiespectral de las plantas utilizadas en distintos planos focales e identificar cuál es el *slide* con la menor cantidad de *blur* en cada una de las bandas utilizadas. Esto permitió elegir un OOI en la escena como lo son las hojas y poder realizar una revisión de sus características espectrales sin tener problemas con el ruido o el enfoque de la imagen.

Se procedió a analizar las hojas e identificar el estrés hídrico de estas a lo largo del espectro. La escena generada permitió revisar en gran detalle como la distribución de agua se comporta en las hojas y posteriormente identificar bandas de interés para las plantas utilizadas gracias a la generación del cubo multiespectral. Por tanto, se obtiene un método fiable y comprobado para distinguir el estrés hídrico en una hoja y los valores espectrales relacionados con este fenómeno.

3.5.2 Discusión, limitaciones y trabajo a futuro

Los objetivos establecidos al inicio de esta investigación fueron cumplidos en su totalidad y se logra obtener una base de datos y herramientas de procesamiento de imágenes funcional y efectiva. Se obtiene una solución en tiempo real con el beneficio de además poder prescindir de un cuerpo negro para eliminar el FPN. Se prueba además que el algoritmo de determinación de foco óptimo de un OOI es aplicable a lo largo de distintas bandas del espectro SWIR.

Como se mencionó en el documento, las plantas y vegetación presentan un comportamiento peculiar en IR, incluyendo entre estos el estrés hídrico. Es posible obtener información fidedigna de una escena y utilizarla para identificar zonas donde el riego es necesario, al menos para la planta estudiada.

Dentro de las limitaciones de lo realizado es necesario mencionar que el ambiente de experimentación fue controlado y en un ambiente cerrado, por lo que factores como el polvo, la variación de la luz solar y otros factores no son influyentes. Se debe considerar que además la escena utilizada fue estática en el tiempo, condición que no necesariamente se cumple en casos fuera del ambiente controlado. Finalmente, es importante destacar que el estudio fue realizado para una planta en particular, por lo que no se puede aplicar directamente los resultados obtenidos a cualquier planta o flor.

Los resultados obtenidos permiten establecer una base de análisis plenóptico de vegetación en el SWIR mediante un cubo multispectral. Si bien el trabajo exploró en detalle conceptos como eliminación de ruido y reenfoque, no se descarta que existan métodos más efectivos u optimizaciones de los utilizados. Un ejemplo de esto corresponde al *Focus Stacking* el cual consiste en juntar las imágenes obtenidas mediante reenfoque y generar un enfoque total de la escena, en el anexo se adjunta un ejemplo. En cuanto al estrés hídrico, se logra obtener información limpia de este y abre la ventana a revisiones de las métricas y procesamientos utilizados en otras especies de plantas o flores.

Referencias

- [1] Claus Wasternack, Bettina Hause, Jasmonates and octadecanoids: Signals in plant stress responses and development, *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*, Academic Press, Volume 72, 2002, Pages 165-221, ISSN 0079-6603, ISBN 9780125400725, [https://doi.org/10.1016/S0079-6603\(02\)72070-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6603(02)72070-9).
- [2] Wang WX, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance, *Planta*, 2003, vol. 218 (pg. 1-14)
- [3] Rizhsky L, Liang HJ, Shuman J, Shulaev V, Davletova S, Mittler R. When defense pathways collide. The response of *Arabidopsis* to a combination of drought and heat stress, *Plant Physiology*, 2004, vol. 134 (pg. 1683-1696)
- [4] Anderson JP, Badruzsaufari E, Schenk PM, Manners JM, Desmond OJ, Ehlert C, Maclean DJ, Ebert PR, Kazan K. Antagonistic interaction between abscisic acid and jasmonate–ethylene signaling pathways modulates defense gene expression and disease resistance in *Arabidopsis*, *The Plant Cell*, 2004, vol. 16 (pg. 3460-3479)
- [5] Shao HB, Chu LY, Jaleel CA, Zhao CX. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants, *Comptes Rendus Biologies*, 2008, vol. 331 (pg. 215-225)
- [6] Mittler R, Blumwald E. Genetic engineering for modern agriculture: challenges and perspectives, *Annual Review of Plant Biology*, 2010, vol. 61 (pg. 443-462)
- [7] Easterling DR, Meehl GA, Parmesan C, Changnon SA, Karl TR, Mearns LO. Climate extremes: observations, modeling, and impacts, *Science*, 2000, vol. 289 (pg. 2068-2074)
- [8] Bale JS, Masters GJ, Hodkinson ID, et al. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores, *Global Change Biology*, 2002, vol. 8 (pg. 1-16)
- [9] Luck J, Spackman M, Freeman A, Trebicki P, Griffiths W, Finlay K, Chakraborty S. Climate change and diseases of food crops, *Plant Pathology*, 2011, vol. 60 (pg. 113-121)
- [10] Madgwick JW, West JS, White RP, Semenov MA, Townsend JA, Turner JA, Fitt BDL. Impacts of climate change on wheat anthesis and fusarium ear blight in the UK, *European Journal of Plant Pathology*, 2011, vol. 130 (pg. 117-131)

- [11] Philip L. Drew, Kenneth A. Sudduth, E. John Sadler, Allen L. Thompson, Development of a multi-band sensor for crop temperature measurement, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 162, 2019, Pages 269-280, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.007>.
- [12] Sun H, Feng M, Xiao L, Yang W, Wang C, Jia X, et al. (2019) Assessment of plant water status in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) based on canopy spectral indices. *PLoS ONE* 14(6): e0216890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216890>
- [13] Chaerle, Laury, Van Der Straeten, Dominique. (2000). Imaging techniques and the early detection of plant stress. *Trends in plant science*. 5. 495-501. 10.1016/S1360-1385(00)01781-7.
- [14] Mahlein, AK., Steiner, U., Hillnhütter, C. et al. Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. *Plant Methods* 8, 3 (2012). <https://doi.org/10.1186/1746-4811-8-3>
- [15] S. D. Khirade and A. B. Patil, "Plant Disease Detection Using Image Processing," 2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation, Pune, India, 2015, pp. 768-771, doi: 10.1109/ICCUBEA.2015.153.
- [16] Jan Behmann, Jörg Steinrücken, Lutz Plümer, Detection of early plant stress responses in hyperspectral images, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 93, 2014, Pages 98-111, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.016>.
- [17] Nilsson, H. (1995). Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Annual review of phytopathology*, 33(1), 489-528.
- [18] Kim, D., Zhang, H., Zhou, H. et al. Highly sensitive image-derived indices of water-stressed plants using hyperspectral imaging in SWIR and histogram analysis. *Sci Rep* 5, 15919 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep15919>
- [19] Hartmut K. Lichtenthaler, Vegetation Stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants, *Journal of Plant Physiology*, Volume 148, Issues 1–2, 1996, Pages 4-14, ISSN 0176-1617, [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80287-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80287-2).
- [20] Cozzolino, D. (2014). Use of infrared spectroscopy for in-field measurement and phenotyping of plant properties: instrumentation, data analysis, and examples. *Applied Spectroscopy Reviews*, 49(7), 564-584.
- [21] Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., Grégoire, J. M. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote sensing of environment*, 77(1), 22-33.

- [22] Grant, O. M., Tronina, L., Jones, H. G., Chaves, M. M. (2007). Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 815-825.
- [23] Maria F. Buitrago, Thomas A. Groen, Christoph A. Hecker, Andrew K. Skidmore, Changes in thermal infrared spectra of plants caused by temperature and water stress, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 111, 2016, Pages 22-31, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.11.003>.
- [24] Eitel, J. U., Gessler, P. E., Smith, A. M., Robberecht, R. (2006). Suitability of existing and novel spectral indices to remotely detect water stress in *Populus* spp. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3), 170-182.
- [25] W. C. Brown, "The History of Power Transmission by Radio Waves," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, September 1984, doi: 10.1109/TMTT.1984.1132833.
- [26] J. F. Ramsay, "Microwave Antenna and Waveguide Techniques before 1900," in *Proceedings of the IRE*, vol. 46, no. 2, pp. 405-415, Feb. 1958, doi: 10.1109/JRPROC.1958.286869.
- [27] Agrafiotis, P., Doulamis, A., Athanasiou, G., Amditis, A. (2016, June). Real time earthquake's survivor detection using a miniaturized LWIR camera. In *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments* (pp. 1-4).
- [28] Blatchley III, E. R., Dumoutier, N., Halaby, T. N., Levi, Y., Laine, J. M. (2001). Bacterial responses to ultraviolet irradiation. *Water Science and Technology*, 43(10), 179-186.
- [29] West, M. H., Barsley, R. E. (1992). Ultraviolet forensic imaging. *FBI L. Enforcement Bull.*, 61, 14.
- [30] Hasegawa, B. H. (1990). *The physics of medical x-ray imaging*.
- [31] Bernier, J., Hall, E. J., Giaccia, A. (2004). Radiation oncology: a century of achievements. *Nature Reviews Cancer*, 4(9), 737-747.
- [32] Greffet, J. J., Bouchon, P., Brucoli, G., Sakat, E., Marquier, F. (2016). Generalized kirchhoff law. arXiv preprint arXiv:1601.00312.
- [33] Fritzsche, Hellmut. "Wien's law". *Encyclopedia Britannica*, 24 Oct. 2016, <https://www.britannica.com/science/Wiens-law>. Accessed 13 June 2023.

- [34] Levenson, R. M., Mansfield, J. R. (2006). Multispectral imaging in biology and medicine: slices of life. *Cytometry Part A: the journal of the International Society for Analytical Cytology*, 69(8), 748-758.
- [35] Qin, J., Chao, K., Kim, M. S., Lu, R., Burks, T. F. (2013). Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *Journal of Food Engineering*, 118(2), 157-171.
- [36] H. Liang, "Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation," *Appl. Phys. A*, 106 (2), 309–323 (2012).
- [37] M. Govender, K. Chetty, H. Bulcock, "A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies," *Water SA*, 33 (2), 145–151 (2007). WASADV 0378-4738
- [38] A. A. Gowenlock et al., "Hyperspectral imaging—an emerging process analytical tool for food quality and safety control," *Trends Food Sci. Technol.*, 18 (12), 590–598 (2007). <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2007.06.001> TFTEEH 0924-2244
- [39] J. Kuula et al., "Using VIS/NIR and IR spectral cameras for detecting and separating crime scene details," *Proc. SPIE*, 8359 83590P (2012). <http://dx.doi.org/10.1117/12.918555> PSISDG 0277-786X
- [40] R. L. Schuler, P. E. Kish, C. A. Plese, "Preliminary observations on the ability of hyperspectral imaging to provide detection and visualization of bloodstain patterns on black fabrics," *J. Forensic Sci.*, 57 (6), 1562–1569 (2012).
- [41] Netinant, P., Vasprasert, P., Rukhiran, M. (2021, April). Evaluations of effective on LWIR micro thermal camera IoT and digital thermometer for human body temperatures. In 2021 The 5th International Conference on E-Commerce, E-Business and E-Government (pp. 20-24).
- [42] Daveri, A., Paziani, S., Marmion, M., Harju, H., Vidman, A., Azzarelli, M., Vagnini, M. (2018). New perspectives in the non-invasive, in situ identification of painting materials: The advanced MWIR hyperspectral imaging. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 98, 143-148.
- [43] Ronald G. Driggers, Van Hodgkin, and Richard Vollmerhausen "What good is SWIR? Passive day comparison of VIS, NIR, and SWIR", *Proc. SPIE 8706, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIV*, 87060L (10 June 2013); <https://doi.org/10.1117/12.2016467>
- [44] K. Watson, "Geologic applications of thermal infrared images, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 63, no. 1, pp. 128-137, Jan. 1975, doi: 10.1109/PROC.1975.9712.

- [45] Diego A. Socolinsky, Andrea Selinger, Joshua D. Neuheisel, Face recognition with visible and thermal infrared imagery, *Computer Vision and Image Understanding*, Volume 91, Issues 1–2, 2003, Pages 72–114, ISSN 1077-3142, [https://doi.org/10.1016/S1077-3142\(03\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S1077-3142(03)00075-4).
- [46] Vadivambal, R., Jayas, D.S. Applications of Thermal Imaging in Agriculture and Food Industry—A Review. *Food Bioprocess Technol* 4, 186–199 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0333-5>
- [47] King, A. Technology: The Future of Agriculture. *Nature* 544, S21–S23 (2017). <https://doi.org/10.1038/544S21a>
- [48] Maimunah Mohd Ali, Norhashila Hashim, Samsuzana Abd Aziz, Ola Lasekan, Emerging non-destructive thermal imaging technique coupled with chemometrics on quality and safety inspection in food and agriculture, *Trends in Food Science and Technology*, Volume 105, 2020, Pages 176–185, ISSN 0924-2244, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.003>.
- [49] Prashar, A., Jones, H.G. (2016). Assessing Drought Responses Using Thermal Infrared Imaging. In: Duque, P. (eds) *Environmental Responses in Plants. Methods in Molecular Biology*, vol 1398. Humana Press, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3356-3>
- [50] Kim, Minchul and Suh, Taeweon. (2021). Eavesdropping Vulnerability and Countermeasure in Infrared Communication for IoT Devices. *Sensors*. 21. 8207. [10.3390/s21248207](https://doi.org/10.3390/s21248207).
- [51] Sánchez, M. T., Entrenas, J. A., Torres, I., Vega, M., Pérez-Marín, D. (2018). Monitoring texture and other quality parameters in spinach plants using NIR spectroscopy. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 446–452.
- [52] Porep, J. U., Kammerer, D. R., and Carle, R. (2015). On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production. *Trends in Food Science and Technology*, 46(2), 211–230.
- [53] Hauff, P. (2008). An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. *Spectral International Inc*, 80001, 303–403.
- [54] Ge, Y., Atefi, A., Zhang, H., Miao, C., Ramamurthy, R. K., Sigmon, B., ... and Schnable, J. C. (2019). High-throughput analysis of leaf physiological and chemical traits with VIS–NIR–SWIR spectroscopy: a case study with a maize diversity panel. *Plant methods*, 15(1), 1–12.
- [55] Daveri, A., Paziani, S., Marmion, M., Harju, H., Vidman, A., Azzarelli, M., and Vagnini, M. (2018). New perspectives in the non-invasive, in situ identification of painting materials: The advanced MWIR hyperspectral imaging. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 98, 143–148.

- [56] Bourlai, T., and Cukic, B. (2012, June). Multi-spectral face recognition: Identification of people in difficult environments. In 2012 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (pp. 196-201). IEEE.
- [57] Schöller, F. E., Plenge-Feidenhans, M. K., Stets, J. D., and Blanke, M. (2019). Assessing deep-learning methods for object detection at sea from LWIR images. *IFAC-PapersOnLine*, 52(21), 64-71.
- [58] Messinger, D. W., Van Aardt, J., McKeown, D., Casterline, M., Faulring, J., Raqueño, N., ... and Velez-Reyes, M. (2010, August). High-resolution and LIDAR imaging support to the Haiti earthquake relief effort. In *Imaging Spectrometry XV* (Vol. 7812, pp. 177-188). SPIE.
- [59] Lehmann, J. R. K., Große-Stoltenberg, A., Römer, M., and Oldeland, J. (2015). Field spectroscopy in the VNIR-SWIR region to discriminate between Mediterranean native plants and exotic-invasive shrubs based on leaf tannin content. *Remote Sensing*, 7(2), 1225-1241.
- [60] Braga, P., Crusiol, L. G. T., Nanni, M. R., Caranhato, A. L. H., Fuhrmann, M. B., Nepomuceno, A. L., ... and Mertz-Henning, L. M. (2021). Vegetation indices and NIR-SWIR spectral bands as a phenotyping tool for water status determination in soybean. *Precision Agriculture*, 22, 249-266.
- [61] M. Govender, K. Chetty, H. Bulcock, "A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies," *Water SA*, 33 (2), 145 –151 (2007). WASADV 0378-4738
- [62] Garner, J. R. (2019). Light Field Cameras Offer Surveillance a New Dimension. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- [63] Rodrigues, M., de Oliveira, R. B., Dos Santos, G. L. A. A., de Oliveira, K. M., Reis, A. S., Furlanetto, R. H., ... and Nanni, M. R. (2022). Rapid quantification of alkaloids, sugar and yield of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) varieties by using Vis–NIR–SWIR spectroradiometry. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 274, 121082.
- [64] Huo, L., Persson, H. J., and Lindberg, E. (2021). Early detection of forest stress from European spruce bark beetle attack, and a new vegetation index: Normalized distance red and SWIR (NDRS). *Remote Sensing of Environment*, 255, 112240.
- [65] Kandylakis, Z., Falagas, A., Karakizi, C., and Karantzalos, K. (2020). Water Stress Estimation in Vineyards from Aerial SWIR and multispectral UAV data. *Remote Sensing*, 12(15), 2499.

- [66] Kim, D., Zhang, H., Zhou, H. et al. Highly sensitive image-derived indices of water-stressed plants using hyperspectral imaging in SWIR and histogram analysis. *Sci Rep* 5, 15919 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep15919>
- [67] Kłosowski M, Sun Y. Fixed Pattern Noise Reduction and Linearity Improvement in Time-Mode CMOS Image Sensors. *Sensors*. 2020; 20(20):5921. <https://doi.org/10.3390/s20205921>
- [68] Jia, J., Wang, Y., Zhuang, X., Yao, Y., Wang, S., Zhao, D., ... Wang, J. (2016, November). TDDA technology for high spatial resolution SWIR InGaAs imaging. In *Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies IV* (Vol. 10030, pp. 89-95). SPIE.
- [69] Utkin, V. F. (2020). Scene-based Non-uniformity Fixed Pattern Noise Correction Algorithm for Infrared Video Sequences.
- [70] Nguyen, L. D. (2022). Zone-Based Nonuniformity Correction Algorithm for Removing Fixed Pattern Noise in Hyperspectral Images (Doctoral dissertation, University of Dayton).
- [71] Coelho Caro, P. A. (2016). Análisis y construcción de un sistema Plenóptico Infrarrojo. (2021)
- [72] N. Ren, “Fourier slice photography”, *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, no. 3, p. 735–744, jul 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1073204.1073256>
- [73] Sara, U., Akter, M., and Uddin, M. S. (2019). Image quality assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—a comparative study. *Journal of Computer and Communications*, 7(3), 8-18.
- [74] Setiadi, D. R. I. M. (2021). PSNR vs SSIM: imperceptibility quality assessment for image steganography. *Multimedia Tools and Applications*, 80(6), 8423-8444.
- [75] Liu, Y. H., Yang, K. F., and Yan, H. M. (2019). No-reference image quality assessment method based on visual parameters. *Journal of Electronic Science and Technology*, 17(2), 171-184.
- [76] Bare, B., Li, K., and Yan, B. (2017, July). An accurate deep convolutional neural networks model for no-reference image quality assessment. In *2017 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)* (pp. 1356-1361). IEEE.
- [77] Jara, A., Machuca, G., Torres, S. N., Coelho, P. A., and Perez, F. (2021). A reference-free image index to simultaneously quantify infrared-imaging fixed-pattern-noise and blur artifacts. *IEEE Access*, 9, 121593-121607.(2022)

- [78] Adelson, E. H., and Bergen, J. R. (1991). The plenoptic function and the elements of early vision. *Computational models of visual processing*, 1(2), 3-20.
- [79] M. Levoy y P. Hanrahan, "Light field rendering", *SigGraph*, 1996.
- [80] N. Ren, "Fourier slice photography", *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, no. 3, p. 735–744, jul 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1073204.1073256>
- [81] Perry, D. L., and Dereniak, E. L. (1993). Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors. *Optical Engineering*, 32(8), 1854-1859.
- [82] Z. Wang and A. C. Bovik, "Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 26, no. 1, pp. 98–117, Jan. 2009
- [83] Ma, S., Zhou, Y., Gowda, P. H., Dong, J., Zhang, G., Kakani, V. G., ... and Jiang, W. (2019). Application of the water-related spectral reflectance indices: A review. *Ecological indicators*, 98, 68-79.
- [84] Pertuz, Said and Puig, Domenec and García, Miguel and Fusiello, Andrea. (2012). Generation of All-in-Focus Images by Noise-Robust Selective Fusion of Limited Depth-of-Field Images. *IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*. 22. 10.1109/TIP.2012.2231087.
- [85] Katsoulas, N., Elvanidi, A., Ferentinos, K. P., Kacira, M., Bartzanas, T., and Kittas, C. (2016). Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review. *Biosystems Engineering*, 151, 374-398.

4. Anexo

4.0.1 Fourier Slice Theorem y Fourier Slice Photography Theorem

Se procede, basándonos en el operador de fotografía plenóptica, a revisar el concepto de *Fourier Slice Theorem*, el cual define que un corte (*slice*) unidimensional de la transformada de Fourier de un objeto bidimensional es el equivalente a la transformada de Fourier de una proyección proveniente de la transformada de Radón en un ángulo θ del mismo objeto. En otras palabras, la proyección unidimensional de un objeto bidimensional posteriormente transformado al plano de la frecuencia es el símil de un corte del mismo objeto en el plano de Fourier. Este resultado es de suma importancia, ya que permite mediante el *slice* del espacio de Fourier obtener la proyección en el espacio coordenado, permitiendo así generar la reconstrucción del objeto basándonos en estos cortes.

$$\mathcal{F}^1 \circ \mathcal{I}_1^2 \circ \mathcal{R}_\theta = \mathcal{S}_1^2 \circ \mathcal{R}_\theta \circ \mathcal{F}^1 \quad (16)$$

La ecuación que define el teorema, el cual está basado en un objeto bidimensional, corresponde a la ecuación 16 donde $\mathcal{F}^1, \mathcal{F}^2$ corresponden a la transformada de Fourier unidimensional y bidimensional, $\mathcal{I}_1^2 \circ \mathcal{R}_\theta$ es la transformada de Radón con sus componentes de rotación e integración y finalmente $\mathcal{S}_\infty^\epsilon$ es un corte realizado de una dimensión mayor a una menor.

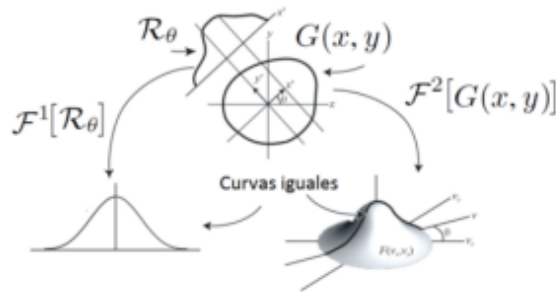


Figura 4.1: Representación visual de la relación entre proyección y corte.

El teorema es aplicable para objetos de N dimensiones, por lo que una forma generalizada de este para cualquier dimensión a la que se aplique corresponde a la ecuación 17.

$$\mathcal{F}^M \mathcal{I}_N^M \circ \mathcal{B} = \mathcal{S}_N^M \circ \frac{\mathcal{B}^{-T}}{|\mathcal{B}^{-T}|} \circ \mathcal{F}^N \quad (17)$$

Donde se reemplazó el operador \mathcal{R} de rotación, por \mathcal{B} esto, puesto que en espacios superiores se trabajan co-

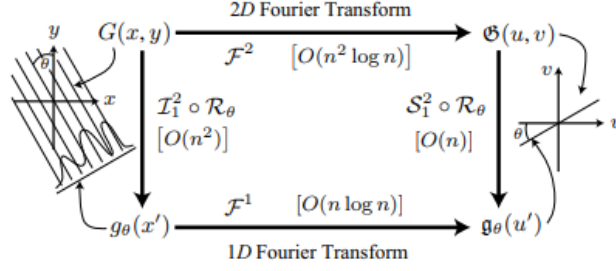


Figura 4.2: Esquema del *Fourier Slice Theorem* aplicado a un objeto bidimensional.

mo cambios de base. Considere ahora que se puede aplicar la definición de este teorema al operador fotográfico descrito en la ecuación 8 considerando que este corresponde a la proyección integral del campo de tras un cambio de base, entiéndase un corte. Utilizando la notación de operadores discretos definida anteriormente sobre la ecuación 8 se obtiene el operador transformado definido en la ecuación 18

$$\mathcal{P}_\alpha[L_F] = \frac{1}{\alpha F^2} \mathcal{I}_2^4 \circ \mathcal{B}_\alpha[L_F] \quad (18)$$

Definiendo \mathcal{B}_α como el cambio de base siguiente:

$$\mathcal{B}_\alpha = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 1-\alpha & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 1-\alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Reemplazamos entonces en el operador fotográfico con operadores discretos en coordenadas para obtener operaciones en el espacio de la frecuencia, despejando el teorema descrito en la fórmula 17 con el objetivo de reemplazar los valores $\mathcal{I}_2^4 \circ \mathcal{B}_\alpha[L_F]$ en la ecuación 18. Obteniéndose así lo descrito en la ecuación 20.

$$\mathcal{P}_\alpha = \frac{1}{F^2} \mathcal{F}^{-2} \circ \mathcal{S}_2^4 \circ \mathcal{B}_\alpha^{-T} \circ \mathcal{F}^4 \quad (20)$$

Se define posteriormente el operador fotográfico de Fourier como:

$$\mathcal{B}_\alpha = \frac{1}{F^2} \mathcal{S}_2^4 \circ \mathcal{B}_\alpha^{-T} \quad (21)$$

llegando finalmente al *Fourier Slice Photography Theorem* en la ecuación 22

$$\mathcal{P}_\alpha = \mathcal{F}^{-2} \circ \mathcal{B}_\alpha^{-T} \circ \mathcal{F}^4 \quad (22)$$

La ecuación 22 nos dice que una fotografía es la transformada 2-dimensional inversa de Fourier, de un corte 2-dimensional de la transformada 4-dimensional de Fourier del light field. La figura 4.3 muestra en forma de esquema las operaciones y el escalado del procesamiento computacional en cada una.

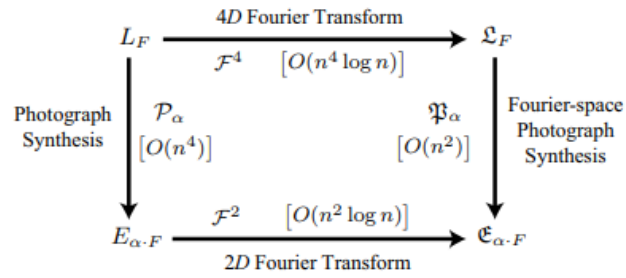


Figura 4.3: Esquema del *Fourier Slice Photography Theorem* aplicado al *lightfield*.

4.0.2 RLP a lo largo del espectro

La figura 4.4 muestra como es el comportamiento de las distintas curvas de *blur* de cada filtro empleado y se aprecia como para ciertas bandas la detección de *blur* se vuelve más drástica y precisa, incluso variando levemente el *slide* en el cual se considera enfocado el objeto.

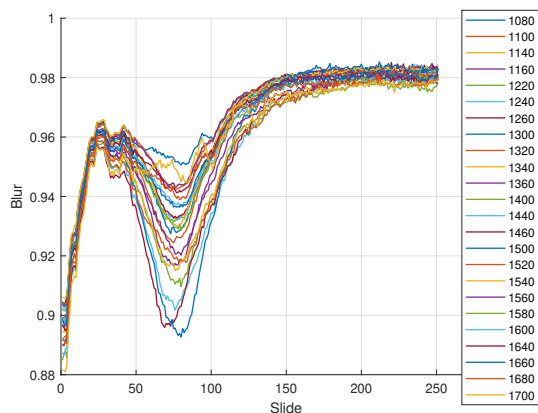


Figura 4.4: Detección de *blur* a lo largo de los 250 planos en el eje Z y a distintas longitudes de onda. Notar como el *slide* óptimo de enfoque va oscilando entre los valores de 75 y 80 dependiendo del filtro utilizado.

4.0.3 *Focus Stacking*

Tras lograr identificar el plano z donde el objeto está enfocado correctamente, se puede obtener una imagen con OOI limpio y sin *blur*. Sin embargo, si se desea, se puede obtener la escena completa en foco realizando una combinación de los planos focales que se obtuvieron. Este procedimiento se denomina *Focus Stacking* y posee diversas maneras de aplicarse. Se desarrolla un método de *stacking* que genera una imagen en foco, en este caso aplicado a la figura 1.8 como se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.5: Resultado de realizar *Focus Stacking* en el arreglo de fotos generado mediante el algoritmo de reenfoque, Visualmente se nota como el fondo y la botella ambos están en foco.

Un requerimiento del procesamiento mencionado aplicado a las imágenes obtenidas mediante el algoritmo de reenfoque es que los planos utilizados deben de ser los libres de ruido, por ende no se pueden utilizar el total de 250 *slides*. Esto es porque el *Focus Stacking* que se está utilizando fue diseñado para lidiar principalmente con *blur* y leves efectos de ruido en el arreglo de imágenes.

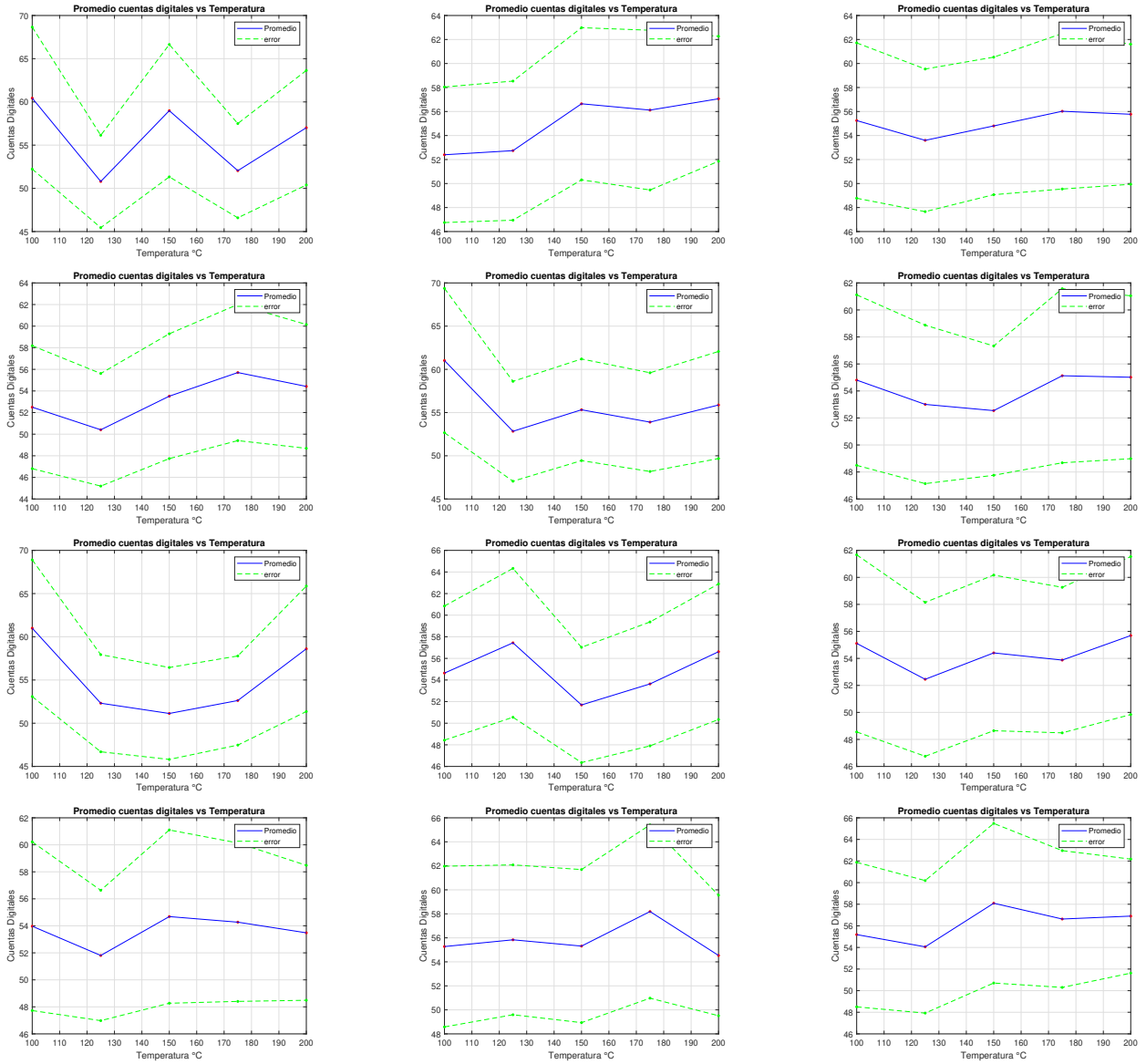


Figura 4.6: De izquierda a derecha el comportamiento de los filtros y su intensidad promedio de pixel por temperatura: 1)1080, 2)1100, 3)1140, 4)1160, 5)1220, 6)1240, 5)1260, 6)1300, 7)1320, 8)1340, 9)1360, 10)1400.

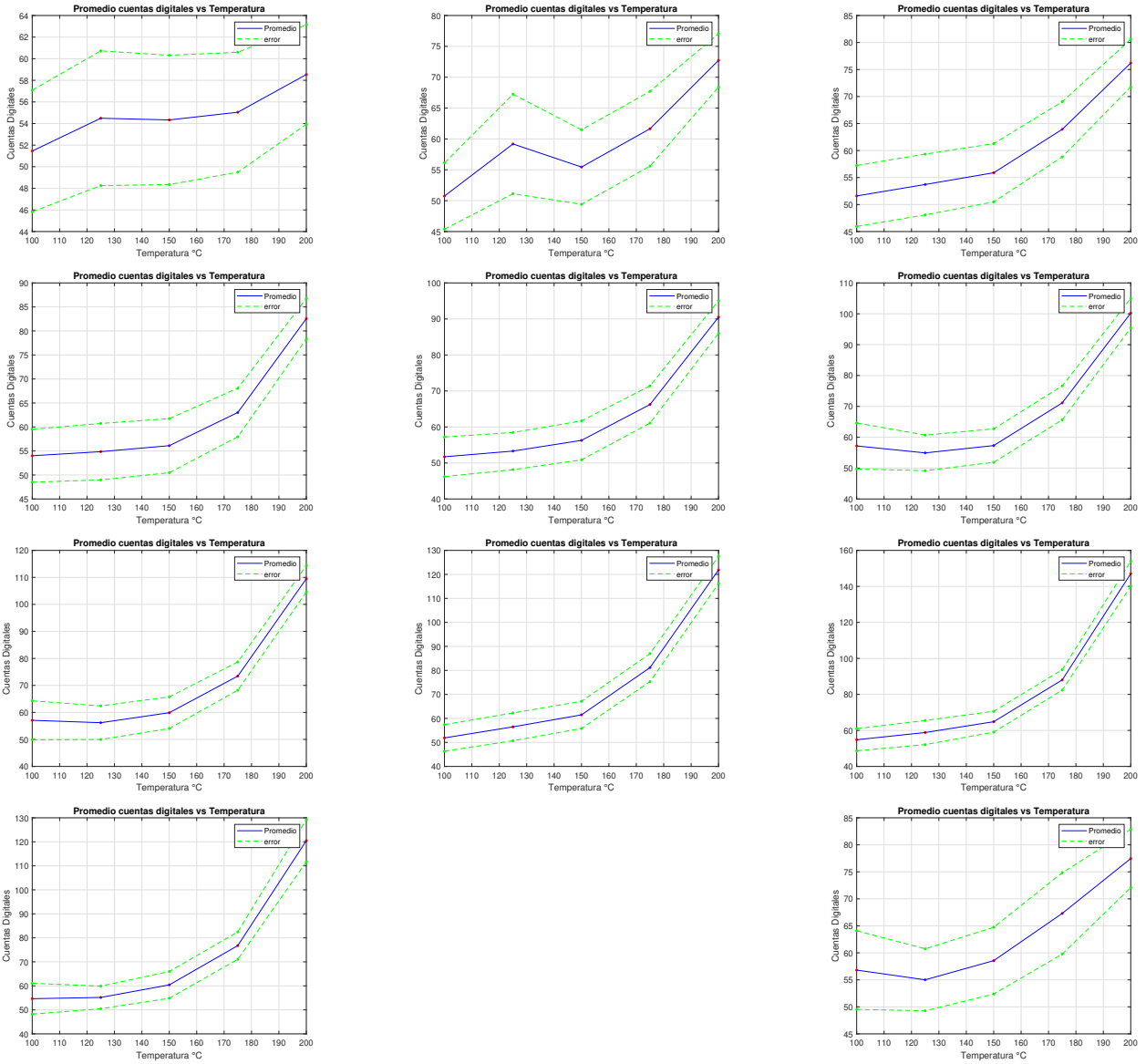


Figura 4.7: De izquierda a derecha el comportamiento de los filtros y su intensidad promedio de pixel por temperatura: 1)1440, 2)1500, 3)1520, 4)1540, 5)1560, 6)1580, 7)1600, 8)1640, 9)1660, 10)1680, 11)1700.

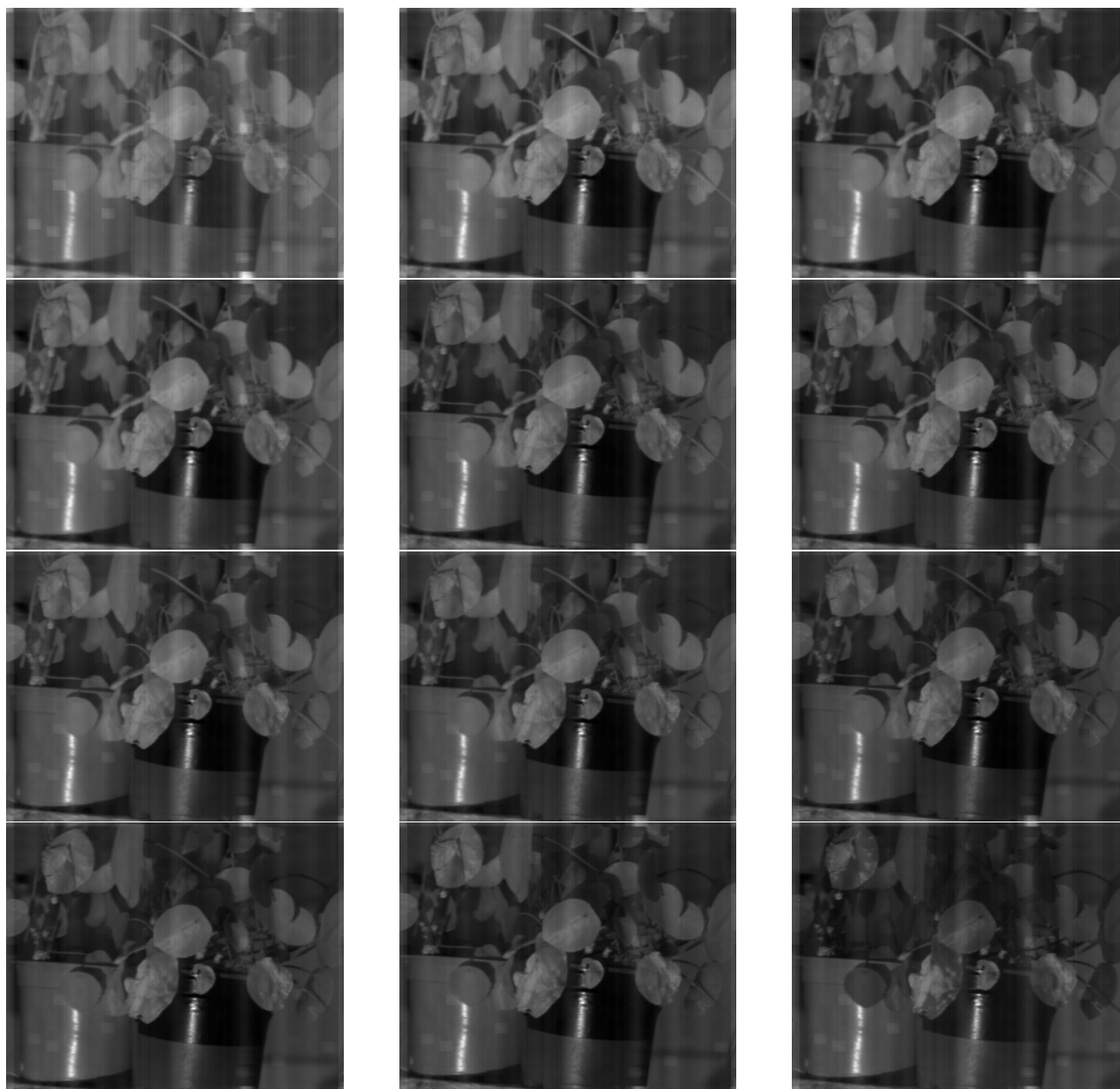


Figura 4.8: Limpieza de FPN en cada filtro utilizado, de izquierda a derecha se tiene: 1)1080, 2)1100, 3)1140, 4)1160, 5)1220, 6)1240, 5)1260, 6)1300, 7)1320, 8)1340, 9)1360, 10)1400.

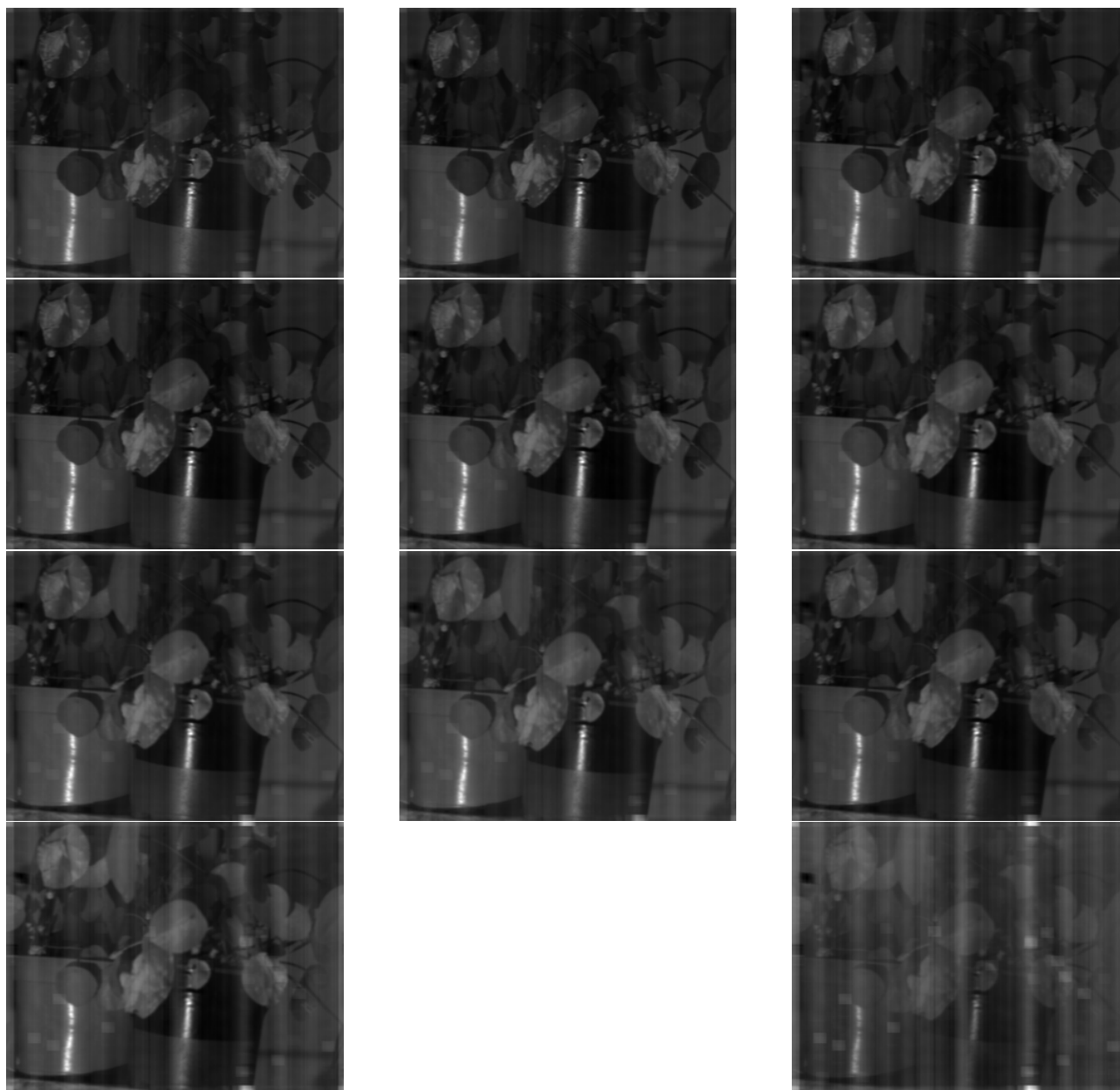


Figura 4.9: Limpieza de FPN en cada filtro utilizado, de izquierda a derecha se tiene: 1)1440, 2)1500, 3)1520, 4)1540, 5)1560, 6)1580, 7)1600, 8)1640, 9)1660, 10)1680, 11)1700.

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO**

Departamento : Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera : Ingeniería civil Electrónica
Nombre del memorista : Joaquín Alonso Lermenda Sandoval
Título de la memoria : ANÁLISIS DEL ESTRÉS HÍDRICO EN PLANTAS Y
CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE UN SISTEMA PLENÓPTICO EN LA BANDA SWIR
Fecha de la presentación oral : 28/08/2023
Profesor(es) guía : Sergio Torres I.
Profesor(es) revisor(es) : Sebastián Godoy M., Gabriel Saavedra M.
Concepto :
Calificación :

Resumen (máximo 200 palabras)

El avance e invención de nuevas técnicas de captura de imágenes infrarrojas en los últimos años han permitido no solamente obtener imágenes más detalladas, sino que además obtener información de una escena cualesquiera que, sin las previamente mencionadas técnicas, no se podría conocer. Los ámbitos en los cuales se desempeña el infrarrojo (IR) son tan variados como únicos, implicando así que no existe una sola solución correcta para los problemas existentes. Una de estas dificultades corresponde a la de como eliminar el ruido en este espectro, obstáculo el cual afecta drásticamente la fidelidad de los datos obtenidos de una escena en IR y en la mayoría de los casos hace imposible analizar la información de manera fidedigna. La presente investigación se centra alrededor de como lidiar con el Fixed Pattern Noise (FPN) mediante un algoritmo de reenfoque, como una alternativa a la calibración con cuerpo negro. Se evalúan los resultados obtenidos mediante el uso de métricas y se compara con los resultados obtenidos con un cuerpo negro. Se eligen plantas como objeto de estudio debido a que en la longitud de onda mencionada se puede apreciar los niveles de estrés hídrico. Se cuantizará el mejoramiento de imagen en diferentes longitudes de onda de este espectro, generando así un cubo multiespectral, el cual permitirá el análisis en el espectro del fenómeno del FPN.