

Tesis de Licenciatura



Universidad  
de  
Buenos Aires

**FCEyN**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Departamento de Física

**Construcción e implementación de un sistema  
integral de caracterización de filtros ópticos  
utilizados en cámaras multiespectrales.**

**Juan Reto Reynal**

Director: Prof. Dr. Hernán Grecco  
Abril 2020





TEMA: Construcción e implementación de un sistema integral de caracterización de filtros ópticos utilizados en cámaras multiespectrales.

ALUMNO: Juan Reto Reynal

L.U. N°: 777/12

LUGAR DE TRABAJO: LEC, Departamento de Física, FCEyN, UBA.

DIRECTOR DEL TRABAJO: Dr. Hernán E. Grecco

FECHA DE INICIACIÓN: Abril de 2019

FECHA DE FINALIZACIÓN: Abril de 2020

FECHA DE EXAMEN:

INFORME FINAL APROBADO POR:

---

Autor:

---

Jurade

---

Director:

---

Jurade

---

Profesora: Silvina Ponce Dawson

---

Jurade



## Resumen

En la tesis de licenciatura de Agustina Pose [Pose, 2017], dirigida por Hernán Grecco quien también dirigió esta tesis, ambos desarrollaron un prototipo de cámaras multi e hiperespectrales para uso satelital junto a la empresa Satellogic. Tras la realización de pruebas y mediciones en tierra, se aprobó la prueba de concepto del prototipo y se lo adaptó a un diseño robusto. La cámara hiperespectral diseñada es hoy una de las cargas útiles (ó *payloads*) a bordo de los satélites argentinos NewSat 1 y NewSat 2 (alias Fresco y Batata), puestos en órbita el 30 de Mayo de 2016, construidos por la empresa Satellogic.

En la presente tesis se propuso una continuación de dicho trabajo, en colaboración con la empresa Satellogic bajo la supervisión del Dr. Martín D. Bordenave, a partir del desarrollo de un sistema integral de caracterización de los filtros de interferencia de banda que son utilizados en las cámaras multiespectrales. Estos filtros permiten el paso de las longitudes de onda que se desean capturar con el sensor de detección principal de la cámara que sólo detecta intensidad lumínica. En consecuencia, la caracterización de los filtros resulta fundamental para garantizar la calidad de las imágenes capturadas.





## Índice

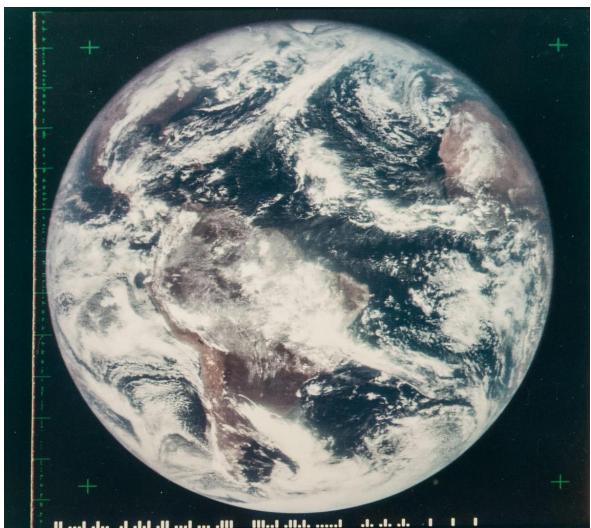
	iii
<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>Índice</b>	
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Adquisición de imágenes multiespectrales .....	2
1.2 Microespectroscopía .....	6
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>11</b>



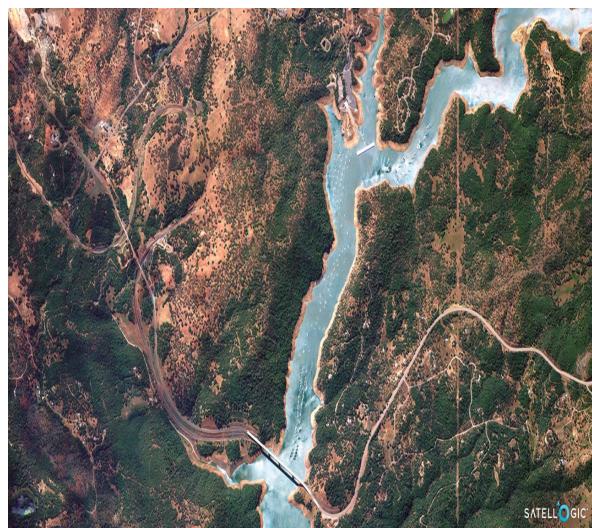
# Capítulo 1

## Introducción

Desde la primera adquisición de una fotografía en color de todo el planeta Tierra por una cámara a bordo del satélite ATS 3 en 1967 (Ver Figura 1.1), a la adquisición de una imagen multiespectral de 1 metro de resolución espacial que permite identificar y hacer conteo individual de árboles de una región de la Tierra (Ver Figura 1.2), la población mundial ha aumentado desde los 3.46 hasta los 7.78 billones de personas (actualidad). ¿Cómo se va a aumentar la producción de alimentos para alimentar una población mundial estimada para 2050 de 9700 millones de personas? ¿Cómo se va a producir la energía necesaria para dicha población sin comprometer los recursos para las futuras generaciones? [•]



**Figura 1.1:** La primera fotografía en color de todo el planeta Tierra, satélite ATS 3 (10 de noviembre de 1967). Adaptado de <https://bit.ly/35j8Jo5>



**Figura 1.2:** Imagen multiespectral de 1 metro de resolución adquirida con una cámara a bordo de uno de los satélites de la compañía Satellogic. Adaptado de <https://bit.ly/3f6vhgn>

Una posible respuesta a estos interrogantes puede estar en el entendimiento de la información que nos pueden brindar las imágenes multi e hiperespectrales adquiridas por medio de cámaras a bordo de satélites en una constelación de tamaño tal que se pueda obtener una imagen de cada región del planeta con una resolución temporal diaria. En este trabajo de tesis se caracterizaron los filtros multiespectrales de dichas cámaras. En particular en este capítulo se describe la motivación del proyecto por medio de la explicación del proceso de aquisición de imágenes multiespectrales [1.1] y luego se explica la teoría general detrás del sistema de caracterización de filtros multiespectrales desarrollado en esta tesis [??].

## 1.1 Adquisición de imágenes multiespectrales

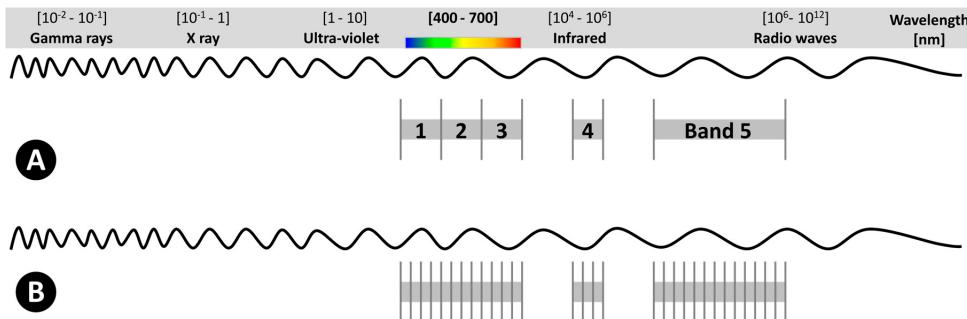
Una imagen a color RGB convencional está compuesta por tres canales de imágenes (bandas): rojo ( $\sim 665\text{nm}$ ), verde ( $\sim 550\text{nm}$ ) y azul ( $\sim 470\text{nm}$ ). Este tipo de imágenes permiten emular la percepción que el ojo humano tiene del color, pero en general no permiten la detección e identificación de distintos objetos sólidos y líquidos, menos aún determinar sus propiedades. Para ello es necesario obtener información sobre la interacción entre la radiación electromagnética y dichos objetos, es decir sobre el espectro del objeto que permite identificarlo de manera análoga a la identificación de una persona mediante su huella dactilar. Esto último es posible a partir de la captura de imágenes multi e hiperespectrales.

La espectroscopía de imágenes multi e hiperespectrales, en inglés *Multispectral and Hyperspectral Spectroscopy Imaging* (MSI y HSI, respectivamente), combina la espectroscopía y la adquisición de imágenes en dos dimensiones. Este método brinda datos espectrales para cada pixel en el campo de visión<sup>1</sup>. A partir de dichos datos se puede extraer información sobre la emisión, reflexión ó absorción del objeto de estudio, que puede ser utilizada para determinar su composición físico-química con una cierta resolución espacial. De esta forma, dependiendo de la aplicación, se pueden identificar tumores de un cáncer [Liu et al., 2015], realizar un control de calidad de la comida identificando bacterias en tiempo real [Park et al., 2008], optimizar la siembra y la cosecha de ciertos cultivos [Kharuf et al., 2018], monitorear focos de incendios [Shin et al., 2019], entre otras aplicaciones.

<sup>1</sup>El campo de visión, en inglés *field of view* (FOV), es el ángulo sólido a través del cual un sensor puede detectar la radiación electromagnética que se desee capturar.

### 1.1. Adquisición de imágenes multiespectrales

Las imágenes multiespectrales contienen un número acotado de bandas espectrales de hasta un par de decenas, con un gran ancho de banda (varias decenas de nm); mientras que las hiperespectrales están formadas por un gran número de bandas espectrales (de cientos a miles), con una resoluciónpectral muy estrecha, de unos pocos nm (Ver Figura 1.3).

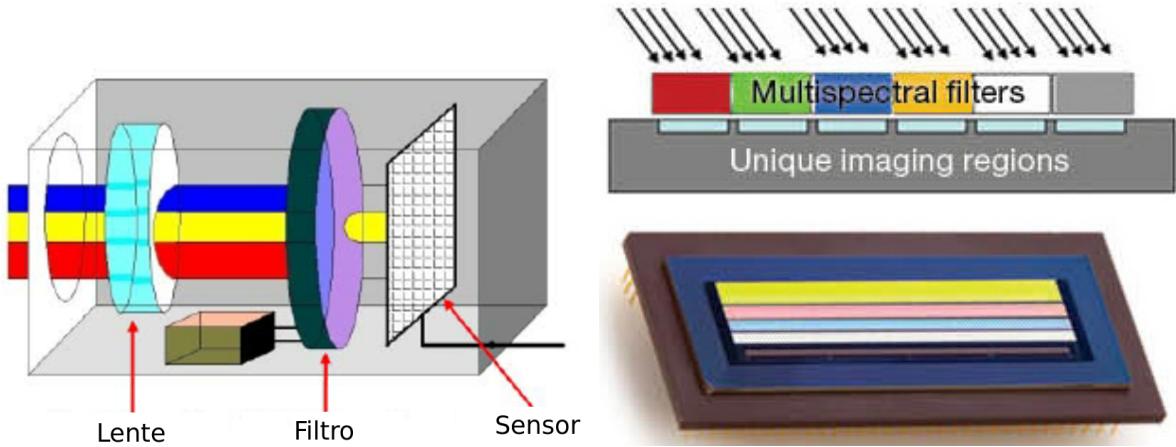


**Figura 1.3:** Representación de los espectros: (A) Multiespectral: 5 bandas anchas; y, (B) Hiperespectral: muchas bandas muy estrechas, generalmente entre cientos y miles de ellas. Los dibujos no se encuentran realizados a escala. Imagen tomada de [Adão et al., 2017].

Las cámaras de adquisición de imágenes multiespectrales estándard utilizan redes de difracción o prismas como elementos dispersivos de la luz [Hao Du et al., 2009]. La distancia requerida entre el sensor de detección y el componente de difracción de la luz, hace que este tipo de cámaras sean muy grandes y muy pesadas, dos condiciones que por ejemplo en la industria satelital se quieren optimizar fuertemente ya que el costo de la puesta en órbita de los satélites es proporcional a su peso y a su tamaño. Estas cámaras suelen ser muy caras y muy sensibles a desalinearse debido a las condiciones mecánicas de su construcción. Esta última condición se agrava en sistemas de difícil manipulación como lo son los satélites, que una vez que se encuentra en órbita, sus componentes ópticos ya no puede ser modificados como para corregir una desalineación que empeore la calidad de las imágenes capturadas.

En respuesta a las desventajas de las cámaras estándard de imágenes multiespectrales, aparecieron otro tipo de cámaras que utilizan filtros de interferencia de banda y que resultaron en un producto final robusto, compacto, de bajo costo y de muy buen rendimiento. Una cámara de vuelo de este tipo fue desarrollada en la tesis de licenciatura de Agustina Pose bajo la dirección de Hernán Grecco [Pose, 2017]. La cámara desarrollada tiene la gran ventaja de no presentar partes móviles, evitando posibles desalineaciones de los componentes ópticos. Las partes móviles de la cámara que serían útiles para realizar un barrido espectral de una cierta

escena a capturar, no son necesarias pues el barrido es realizado por el movimiento propio del satélite respecto de la Tierra. El esquema básico de este tipo de cámaras multiespectrales se muestra en la Figura 1.4, donde una lente enfoca la luz sobre el sensor de imagen que tiene un filtro de múltiples bandas montado arriba de él (Ver Figura 1.5).

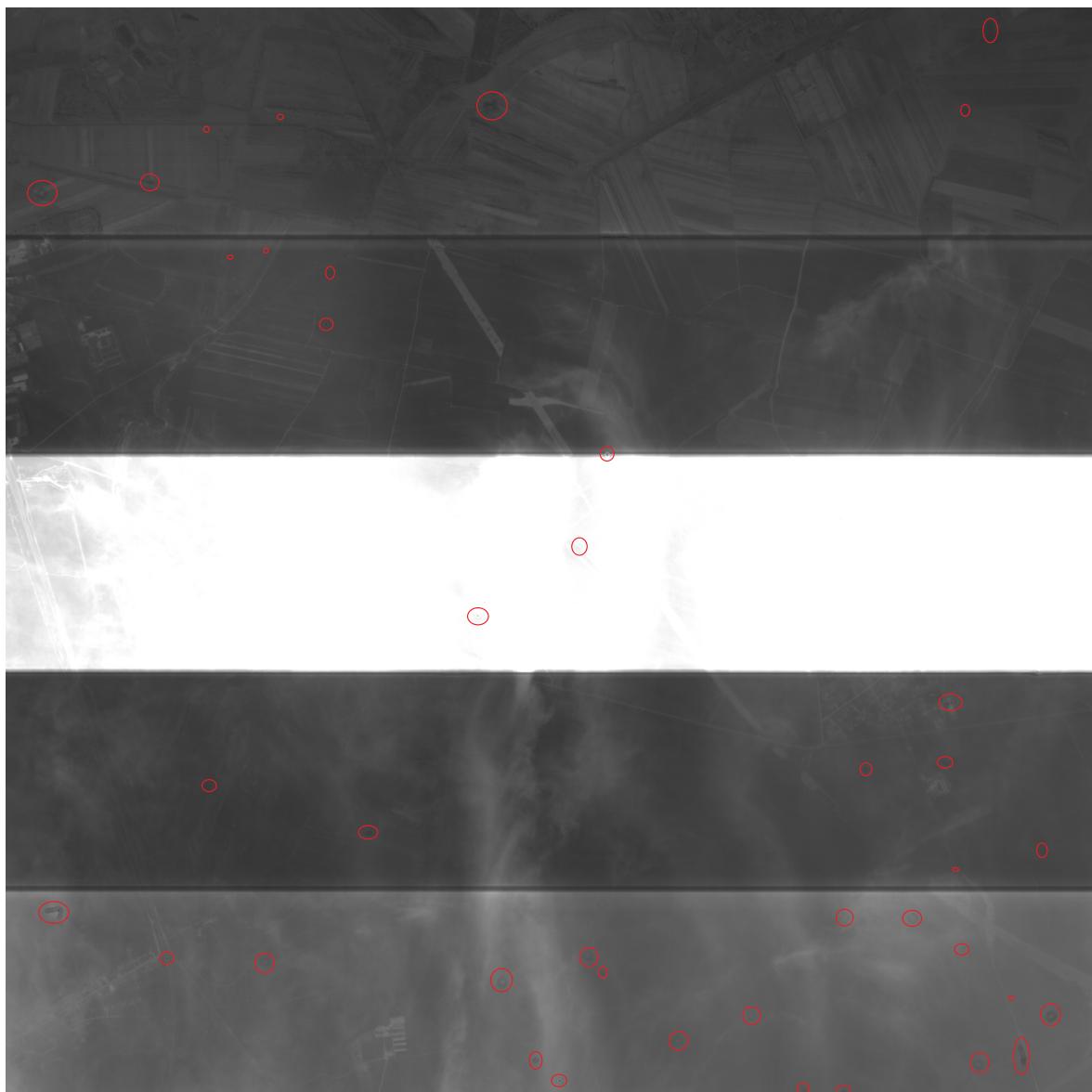


**Figura 1.4:** Esquema de una cámara multiespectral. El filtro absorbe el espectro completo de la luz incidente salvo la banda espectral que el usuario determina, por lo que sólo las longitudes de onda elegidas atraviesan el filtro y son detectadas por el sensor. Adaptado de [Martínez-Usó et al., 2008]

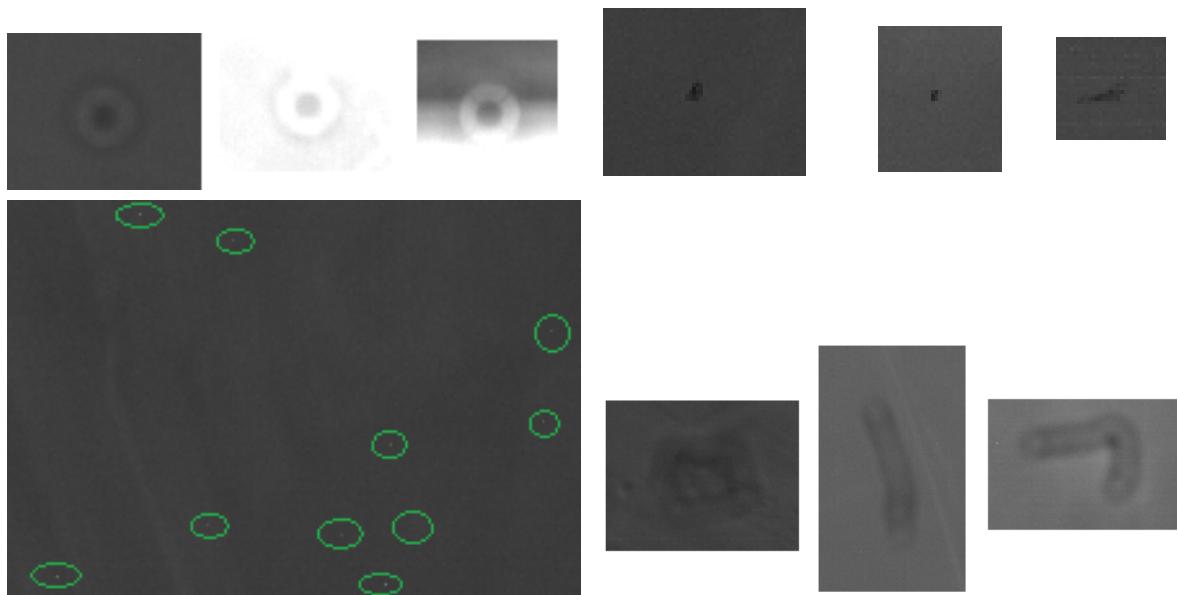
**Figura 1.5:** Filtro de cinco bandas montado directamente sobre el sensor CCD, es decir en el plano focal del mismo. Adaptado de <https://bit.ly/3aTRGds>

Los filtros de interferencia de banda utilizados en este tipo de cámaras deben cumplir ciertos requisitos de calidad como un cierto número, diámetro y tipo de defectos (Ver Capítulo ??) y ciertas características espectrales y de transmisión (Ver Capítulo ??) antes de ser incorporados a la carga útil de, por ejemplo, un satélite que va a ser puesto en órbita. Esto es así pues dichos filtros se encuentran sobre el plano focal de la imagen por lo que cualquier imperfección del mismo puede repercutir en la calidad de la imagen adquirida. En la Figura 1.6 se muestra una imagen multiespectral de cinco bandas cuyas imperfecciones se señalan con círculos rojos. Algunas de esas imperfecciones se muestran de manera aislada en la Figura 1.7. En consecuencia, resulta fundamental caracterizar completamente dichos filtros antes de montarlos sobre las cámaras de la aplicación de interés.

1.1. Adquisición de imágenes multiespectrales



**Figura 1.6:** Imagen multiespectral de cinco bandas, cuyas imperfecciones se señalan con círculos rojos.



**Figura 1.7:** Zoom sobre las imperfecciones de la imagen multiespectral de la Figura 1.6.

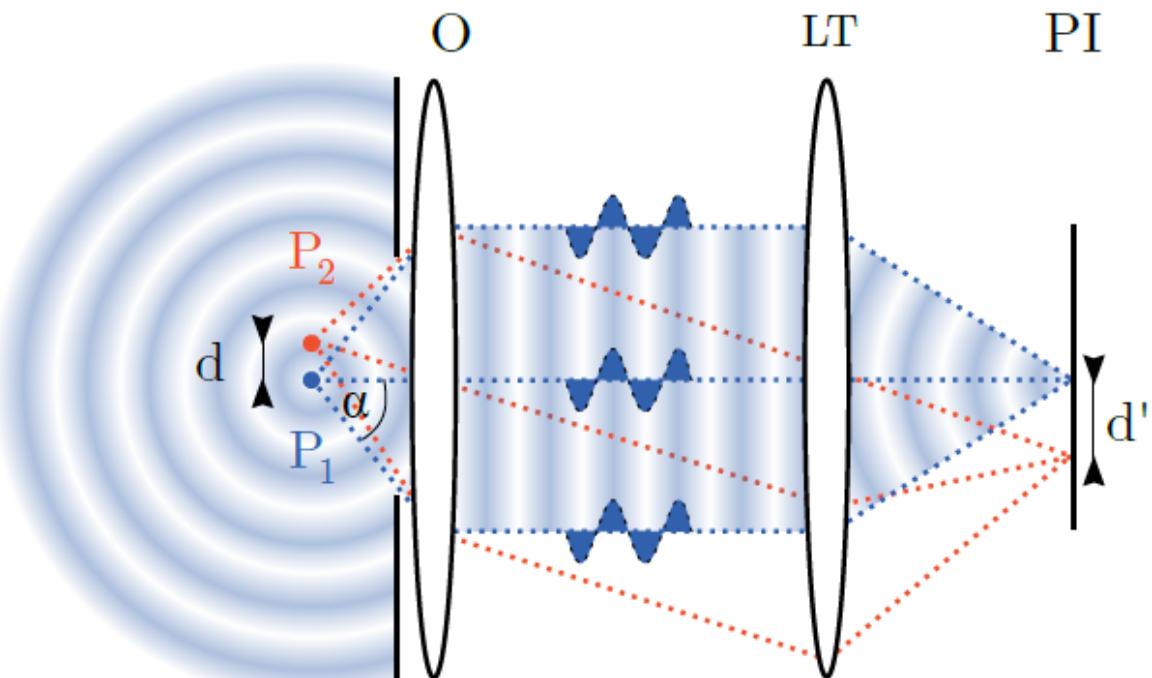
En este trabajo de tesis se desarrolló un sistema automatizado de detección y cuantificación de los defectos del filtro [Capítulo ??]. A partir de los resultados de dicha cuantificación se desarrolló un equipo de caracterización de los defectos y de las características espectrales de las bandas del filtro [Capítulo ??]. A continuación se realiza una introducción a la teoría detrás del equipo desarrollado en el Capítulo ?? que consistió de un microespectrómetro que es un instrumento de medición híbrido que integra la capacidad de magnificación y de resolución ópticas de un microscopio con la capacidad de inferir las propiedades ópticas de un material de un espectrómetro.

## ■ 1.2 Microespectroscopía

La microespectroscopía combina la espectroscopía con la microscopía. Existen distintas aplicaciones de esta técnica para estudiar los espectros de muestras microscópicas como la microespectroscopía en el IR (infrarrojo)[Walsh et al., 2007], de FT-IR (*Fourier Transform - Infrared*) [Kansiz et al., 1999], de Raman [de Faria et al., 1997], etc. En particular en este trabajo se realizaron mediciones de microespectroscopía en el espectro visible y en el cercano

infrarrojo (en adelante NIR<sup>2</sup>), en un rango de longitudes de onda comprendido entre los 450 y los 900 nm.

La técnica de microespectroscopía implementada en esta tesis contempla un microscopio de campo brillante integrado con un espectrómetro y una cámara digital como detectores. La microscopía de campo brillante consiste en la generación con un arreglo de lentes de la imagen de una muestra que es iluminada por una fuente de luz. En la Figura 1.8 se muestra el proceso de formación de imágenes de dos puntos (P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub>) de una muestra en un microscopio de campo brillante con un objetivo corregido a infinito (O). Se posiciona el objetivo de forma tal que la muestra se encuentre a la distancia focal del mismo. La luz transmitida ó reflejada de la muestra es recolectada y colimada por el objetivo y luego es enfocada por la lente de tubo (en inglés, *tube lens*) en el plano imagen (PI) donde un detector como el espectrómetro ó una cámara pueden ser colocados.



**Figura 1.8:** Proceso de formación de imágenes de dos puntos de una muestra en un microscopio de campo brillante con un objetivo corregido a infinito (O). Adaptado de [Bordenave, 2016].

<sup>2</sup>NIR, en inglés *Near-Infrared*, se le denomina a la regiónpectral del infrarrojo cercano que se extiende aproximadamente desde los 780 nm hasta los 2000 nm.

## 1. Introducción

Las características más importantes de un microscopio son su magnificación y el poder de resolución. La magnificación  $M$  del microscopio que indica la relación entre el tamaño de la imagen y del objeto, viene dada por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{f_{LT}}{f_O}, \quad (1.1)$$

donde  $f_{LT}$  es la distancia focal de la lente de tubo y  $f_O$  es la distancia focal del objetivo.

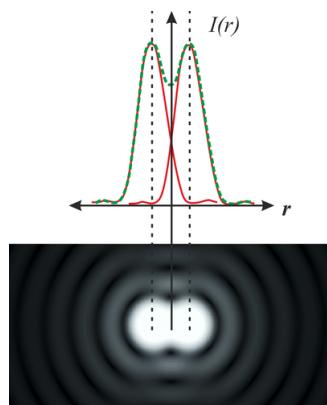
El poder óptico de resolución espacial del microscopio estimado teóricamente por el Criterio de Rayleigh viene dado por la siguiente ecuación:

$$d = \frac{0.61 \lambda}{N.A.}, \quad (1.2)$$

donde  $d$  es la distancia de separación entre los dos puntos de la muestra,  $\lambda$  es la longitud de onda de la fuente de luz utilizada y  $N.A. = n \sin(\alpha)$  es la apertura numérica del objetivo, con  $n$  el índice de refracción del medio y  $\alpha$  la mitad del ángulo de recolección del objetivo (Ver Figura 1.8). El criterio de Rayleigh establece que las imágenes de dos fuentes puntuales, incoherentes, de igual intensidad pueden ser, en el límite, distinguidas por un sistema de lentes formador de imágenes, si el centro de uno de los discos de Airy<sup>3</sup> coincide con el primer mínimo del patrón de Airy de la segunda fuente puntual (Ver Figura 1.9).

---

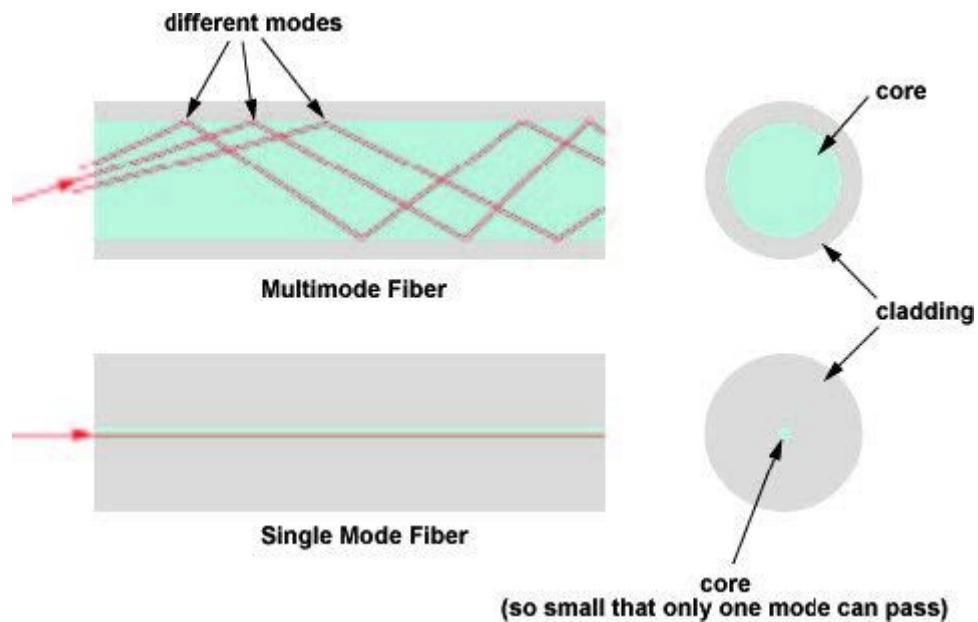
<sup>3</sup>Debido a la naturaleza ondulatoria de la luz, las ondas electromagnéticas interfieren en el plano imagen generando un patrón de intensidad en dos dimensiones con un máximo en el punto focal, denominado patrón de difracción de Airy [Hecht, 2012].



**Figura 1.9:** Criterio de Rayleigh para la determinación del límite de resolución. Las curvas rojas representan los patrones de Airy individuales de las dos fuentes puntuales, mientras que la curva verde representa la imagen de las dos fuentes. Las líneas punteadas verticales indican la posición del máximo de cada patrón individual de Airy. Adaptado de [Bhattacharya, 2017].

La luz que es enfocada por la lente de tubo en el plano imagen es detectada por un espectrómetro en el caso de un microespectrómetro. Para poder aprovechar el poder de resolución óptico del objetivo del microscopio, de acuerdo al Teorema de Nyquist-Shannon se debería utilizar un detector con un área sensible de detección cuyo diámetro sea igual a la mitad del valor de la resolución estimada por Rayleigh. En el caso de una cámara para poder aprovechar la resolución del objetivo cada píxel de la misma debería tener un diámetro equivalente igual a la mitad del valor de la resolución estimada teóricamente. En el caso del espectrómetro se debe considerar el diámetro del *core* de la fibra óptica que guía la luz vía reflexión interna desde el plano imagen (plano de detección) hacia la apertura del espectrómetro.

La fibra óptica es un medio de transmisión de la luz que opera como una guía de ondas dieléctrica cilíndrica por el cual se propaga un único modo si la fibra es monomodo ó múltiples modos si la fibra es multimodo (Ver Figura 1.10). El *core* de la fibra es la región de la fibra (Ver Figura 1.10)



**Figura 1.10:** Fibras ópticas mono y multimodo. Adaptado de <https://bit.ly/3favhME>.

Observaciones generales del contenido de la tesis:

- Los programas escritos son referenciados con un link al que se puede acceder haciendo click sobre el ícono de github:

## Referencias Bibliográficas

- [Adão et al., 2017] Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., and Sousa, J. (2017). Hyperspectral imaging: A review on uav-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sensing*, 2017:1110.
- [Battacharya, 2017] Bhattacharya, A. (2017). *Terahertz Micro-resonators Investigated in the Near and Far-field*. PhD thesis.
- [Bordenave, 2016] Bordenave, M. D. (2016). *Mediciones con resolución nanométrica mediante depleción por emisión estimulada*. PhD thesis, UBA, Argentina. Director: Dr. Fernando D. Stefani.
- [de Faria et al., 1997] de Faria, D. L. A., Venâncio Silva, S., and de Oliveira, M. T. (1997). Raman microspectroscopy of some iron oxides and oxyhydroxides. *Journal of Raman Spectroscopy*, 28(11):873–878.
- [Hao Du et al., 2009] Hao Du, Xin Tong, Xun Cao, and Stephen Lin (2009). A prism-based system for multispectral video acquisition. In *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, pages 175–182.
- [Hecht, 2012] Hecht, E. (2012). *Optics*. Pearson.
- [Kansiz et al., 1999] Kansiz, M., Heraud, P., Wood, B., Burden, F., Beardall, J., and McNaughton, D. (1999). Fourier transform infrared microspectroscopy and chemometrics as a tool for the discrimination of cyanobacterial strains. *Phytochemistry*, 52(3):407 – 417.
- [Kharuf et al., 2018] Kharuf, S., Orozco, R., Aday, O., and Pineda, E. (2018). Multispectral aerial image processing system for precision agriculture. 16:45–58.
- [Liu et al., 2015] Liu, W.-L., Wang, L.-W., Chen, J.-M., Yuan, J.-P., Xiang, Q.-M., Yang, G.-F., Qu, A., and Liu, J. (2015). Application of multispectral imaging in quantitative immunohistochemistry study of breast cancer: a comparative study. *Tumour biology : the journal of the International Society for Oncodevelopmental Biology and Medicine*, 37.

## 1. Introducción

- [Martínez-Usó et al., 2008] Martínez-Usó, A., Pla, F., Sotoca, J., and García-Sevilla, P. (2008). From narrow to broad band design and selection in hyperspectral images. volume 5112, pages 1091–1100.
- [Park et al., 2008] Park, B., Kise, M., Lawrence, K., Windham, W., and Yoon, S.-C. (2008). Portable multispectral imaging instrument for food industry\*. *American Society of Agricultural and Biological Engineers - Food Processing Automation Conference 2008*.
- [Pose, 2017] Pose, A. (2017). Adquisición, procesamiento y análisis de imágenes hiperspectrales: de la microscopía de fluorescencia a la industria satelital. Master's thesis, UBA, Argentina. Director: Dr. Hernán Grecco.
- [Shin et al., 2019] Shin, J.-i., Seo, W.-w., Kim, T., Park, J., and Woo, C.-s. (2019). Using uav multispectral images for classification of forest burn severity—a case study of the 2019 gangneung forest fire. *Forests*, 10:1025.
- [Walsh et al., 2007] Walsh, M. J., German, M. J., Singh, M., Pollock, H. M., Hammiche, A., Kyrgiou, M., Stringfellow, H. F., Paraskevaidis, E., Martin-Hirsch, P. L., and Martin, F. L. (2007). Ir microspectroscopy: potential applications in cervical cancer screening. *Cancer Letters*, 246(1):1 – 11.