

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
Mayo 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: 6 de Mayo de 2019

FECHA DE FINALIZACIÓN: Mayo de 2020

FECHA DE EXAMEN:

INFORME FINAL APROBADO POR:

Autor:

Jurada

Director:

Jurado

Profesora: Silvina Ponce Dawson

Jurado

Resumen

En la tesis de licenciatura de Agustina Pose [Pose, 2017], dirigida por Hernán Grecco quien también dirigió esta tesis, ambos evaluaron 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, 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
Resumen	v
Índice	vii
1 Cuantificación de los defectos	1
1.1 Defectos de superficie de un componente óptico.....	1
1.1.1 MIL-PRF-13830: especificaciones de <i>scratch & dig</i>	2
1.1.2 ISO 10110-7: defectos de superficie	5
1.2 Características del filtro	6
1.3 Adquisición de las imágenes del filtro.....	8
1.3.1 Adquisición de imágenes de microscopía por el método de <i>Tile scan</i>	10
1.3.2 Superficies y mapa de los defectos del filtro	12
1.3.3 Adquisición de imágenes individuales de cada banda espectral	15
1.4 Iluminación no uniforme del microscopio	17
1.5 Pre-procesamiento de las imágenes de cada banda espectral	20
1.5.1 Generación de la imagen de fondo: $\Omega_{2.5.1}$	20
1.5.2 Corrección de la iluminación no uniforme de las imágenes individuales del barrido de una banda con la imagen de fondo $\Omega_{2.5.2}$	23
1.6 Criterio de elección del <i>threshold</i> $\Omega_{2.6}$	25
1.7 Algoritmo de detección y cuantificación de los defectos $\Omega_{2.7}$	27
1.8 Resultados del algoritmo de detección de los defectos de superficie $\Omega_{2.8}$	33
1.8.1 Aplicación de la métrica <i>scratch & dig</i>	33

ÍNDICE

1.8.2 Aplicación de la normativa ISO 10110-7	35
1.8.3 Resultados del algoritmo de detección de los huecos	37
1.8.4 Población de defectos detectados en general $\mathbf{Q}_{2.8.4}$	38
1.9 Asociación de incertezas a los resultados del algoritmo	40
Referencias Bibliográficas	43

Capítulo 1

Cuantificación de los defectos

La industria óptica ha desarrollado distintas normativas para especificar la calidad de la superficie óptica de un componente [Young, 1989]. Debido a los requerimientos específicos de la industria de imágenes satelitales, dichas normativas suelen ser insuficientes para anticipar las consecuencias que traen los defectos de un componente óptico en el proceso de formación de imágenes de cámaras hiper y multiespectrales.

1.1 Defectos de superficie de un componente óptico

Se define un defecto de superficie de un componente óptico de manera general como una ruptura de la homogeneidad de la superficie óptica [Gomez et al., 1998]. Estas imperfecciones localizadas consisten de rayaduras, huecos, manchas, burbujas entre otras. La terminología varía dependiendo del sector de la industria óptica que se trate. En particular, en el presente trabajo se caracterizaron defectos de superficie denominados en adelante huecos (Ver Figura 1.1 (a)) y manchas (Ver Figura 1.1 (b)).



Figura 1.1: (a) Defecto de superficie denominado hueco, de $(37 \pm 1)\mu\text{m}$ de diámetro equivalente. (b) Defecto de superficie denominado mancha, de $(6 \pm 1)\mu\text{m}$ de diámetro equivalente.

1. Cuantificación de los defectos

Los defectos de superficie de un componente óptico pueden originarse en el proceso de fabricación mismo, en el tratamiento y manipulación de la óptica, en distintas etapas de un proceso de montaje ó en el transporte del proveedor al cliente. Estos defectos pueden provocar un cambio de las propiedades ópticas del componente y en consecuencia los usuarios deben verificar la calidad óptica que los proveedores detallan en las especificaciones técnicas. Las especificaciones técnicas más utilizadas en la industria para determinar la calidad óptica de un componente son: *U.S. Military Performance Specification MIL-PRF-13830* [Military, 1997] y ISO 10110 [ISO, 2018]. Ambas especificaciones fueron indicadas en la hoja de datos del filtro analizado en el presente trabajo.

■ 1.1.1 MIL-PRF-13830: especificaciones de *scratch & dig*

La especificación técnica MIL-PRF-13830 define un *scratch* (en adelante rayadura) como cualquier marca o rayadura de la superficie óptica del componente y un *dig* (en adelante, simplemente defecto) como cualquier otro defecto de superficie presente en la óptica, como por ejemplo el hueco de la Figura 1.1 (a) ó la mancha de la Figura 1.1 (b). Esta reglamentación define las rayaduras y defectos permitidos en una superficie óptica utilizando una métrica dada por un par de números denominados *scratch and dig numbers*: S/D. El *scratch number* puede tomar alguno de los siguientes valores arbitrarios: 5,10,20,40,60,80, que representan en orden creciente el nivel de brillo de la rayadura. Este número no proviene de una medición experimental, sino que es el resultado de comparar el brillo de la rayadura del componente a analizar con muestras de rayaduras calibradas, como las que se muestran en la Figura 1.2, bajo ciertas condiciones de iluminación específicas (Ver *Inspection method's*: 4.2.2.1 y 4.2.2.2 [Military, 1997]). El *dig number* es el diámetro del defecto más grande permitido en el componente, dado en 1/100 de milímetros. Por ejemplo, un componente con un *dig number* de 40 implica que los defectos más grandes de la óptica pueden ser de un diámetro de hasta 0.4 mm. Si bien el *dig number* es una cantidad medible experimentalmente, con por ejemplo, un microscopio, también se utilizan muestras calibradas para determinar el tamaño y cantidad de los defectos (Ver Figura 1.2). Luego de que un inspector entrenado cuantifica todas las rayaduras y defectos de la óptica con las muestras calibradas, se verifica la calidad óptica del componente de acuerdo a los siguientes criterios:

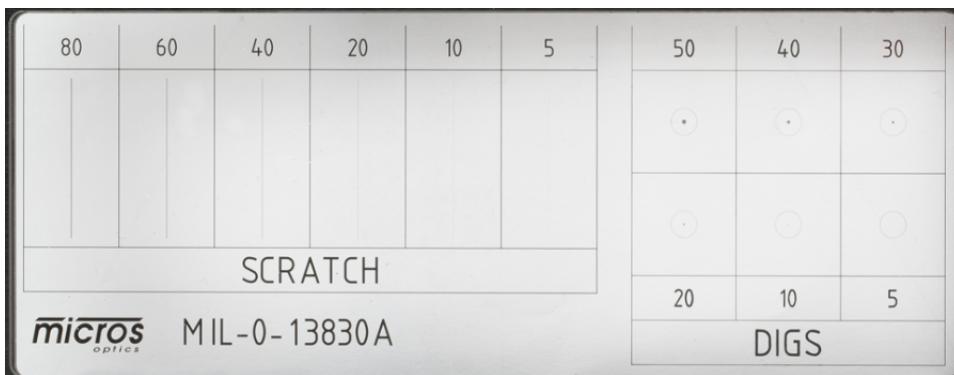


Figura 1.2: Muestra calibrada de *scratch & dig* comercializada por la empresa Thorlabs [Thorlabs, 2020].

- La suma de todas las longitudes¹ de las rayaduras con el *scratch number* ($L_{S\#}$) asociado (máximo valor de brillo permitido) no podrá superar el valor de un cuarto del diámetro (Φ) de la óptica. Si el componente no tuviera una geometría circular, se considera el diámetro de un círculo con un área igual al de la óptica bajo análisis.

$$\sum L_{S\#} < \frac{\Phi}{4} \quad (1.1)$$

- El número total (N) de defectos con el *dig number* asociado (máximo diámetro de los defectos permitido) no podrá exceder el diámetro de la óptica dividido por 20 mm. De obtenerse un número no entero, se trunca el resultado.

$$N < \frac{\Phi}{20mm} \quad (1.2)$$

- La suma de todos los diámetros (d) de los defectos deberá ser menor ó igual al doble del número total de defectos de diámetro máximo permitido (N) multiplicado por el *dig number* ($D\#$), dado en 1/100 de milímetros.

$$\sum d \leq 2.N.D\# \quad (1.3)$$

Así por ejemplo, una óptica de geometría circular con un diámetro de 200 mm y una calidad óptica especificada por el fabricante con *scratch and dig numbers* S/D 30-20, podrá tener

¹La longitud es medida con una regla metálica (*NIST traceable steel ruler*). En el caso de que la rayadura sea curva, su longitud es estimada por el inspector [Aikens, 2010].

1. Cuantificación de los defectos

rayaduras con un brillo calibrado de 30 y la suma de todas las longitudes de las rayaduras de brillo 30 no podrá ser superior a los 50 mm (de acuerdo a (1.1)). Al mismo tiempo, la óptica no podrá tener más de 10 defectos de *dig number* igual a 20, es decir de tamaño máximo de 0.2 mm (de acuerdo a (1.2)) y la suma de los diámetros de todos los defectos no podrá ser superior a los 4 mm (de acuerdo a (1.3)).

La Figura 1.3 muestra una comparación de cuatro muestras de calibración de rayaduras, medidas bajo idénticas condiciones de iluminación [Aikens, 2010].

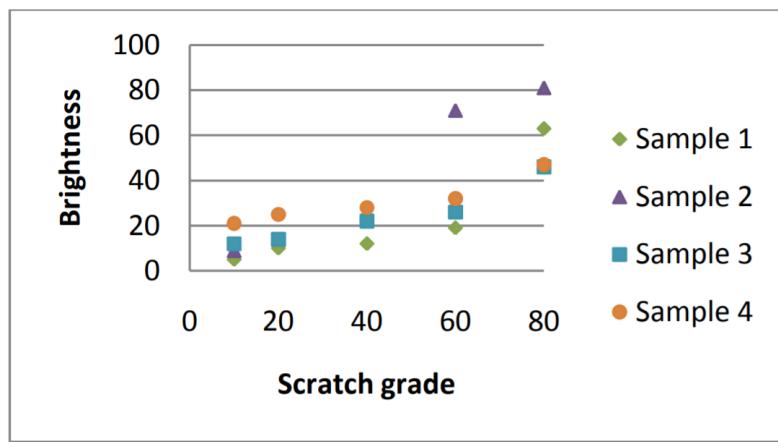


Figura 1.3: Brillo relativo de cuatro muestras calibradas de *scratch number*. *Sample* en inglés significa muestra. La muestra 1 es de la empresa FLIR/Brysen (S&D 1109), la muestra 2 es de Davidson Optronics (D-667A S/N 2431), la muestra 3 es de Eastman Kodak (*paddle* EKCO CM2) y la muestra 4 es de Jenoptik (*paddle* EO #53-157 CM1). Gráfico tomado de [Aikens, 2010].

De la Figura 1.3 se desprende que las cuatro muestras son incompatibles entre sí, es decir arrojan resultados de brillo distintos entre sí para un cierto *scratch number*, lo que indica una cierta ambigüedad de la métrica. Se observa que para un *scratch number* igual a 10, el brillo de la muestra 4 es de mayor intensidad que el *scratch number* 60 de la muestra 1. Así también el brillo del *scratch number* 60 de la muestra 2 es más de dos veces más brillante que cualquiera de las otras muestras para este mismo *scratch number*.

Además, la métrica de *scratch & dig* tiene la falencia de no poder caracterizar ni rayaduras de brillo menores al *scratch number* igual a 5 ni defectos con un *dig number* menor a 5, es decir que en esta métrica no se consideran defectos de diámetro menores a los 50 μm [Turchette and Turner, 2012]. Esto es así pues esos números de *scratch & dig* son los valores

más chicos presentes en las muestras calibradas para la inspección visual de acuerdo a los dibujos técnicos oficiales de la métrica (Ver [Military, 1960]) .

Si bien la métrica de *scratch and dig* sigue siendo ampliamente utilizada en la industria, el hecho de que el análisis de las rayaduras y defectos sea dependiente del inspector de turno sumado a que las muestras de brillo calibradas varían de acuerdo al fabricante de las mismas y que sólo sean considerados defectos con un diámetro mínimo de $50 \mu m$, hacen que esta especificación técnica para determinar la calidad de una óptica resulte técnicamente ambigua e imprecisa. Las especificaciones técnicas de la norma ISO 10110 logran superar estas limitaciones.

■ 1.1.2 ISO 10110-7: defectos de superficie

Las tolerancias de la normativa ISO 10110 vienen dadas por el número de defectos permitidos (N_p) y por un coeficiente denominado *grade number* (A_g) que es igual a la raíz cuadrada del área del defecto de diámetro máximo permitido, dado en mm. Estos dos valores son expresados en las hojas de datos de los componentes ópticos de la siguiente manera: $5/N_p \times A_g$. El número 5 hace referencia a que la especificación técnica se refiere a las tolerancias de los defectos de superficie, específicamente descriptas en la parte 7 de la norma ISO 10110.

Se hace notar que si no es especificado en la hoja de datos del componente, el *grade number* incluye a cualquier tipo de defectos, rayaduras, etc y en ese sentido evita la ambigüedad de la comparación con las muestras calibradas de brillo de las rayaduras. Ahora bien, la normativa establece que el control de calidad de los componentes puede ser realizado por inspección visual con muestras calibradas de defectos con distintos *grade numbers* (Ver MOTP-ISO ó EO # 59-154) y también incluye a la inspección automatizada de los defectos lo que resulta una novedad respecto de la normativa anterior. Sin embargo, de realizarse esto último la reglamentación establece que tiene que haber un acuerdo entre el fabricante y el cliente y que el equipamiento utilizado y las condiciones experimentales específicas para realizar el control de calidad tienen que estar especificadas en la hoja de datos del componente bajo análisis [Schöch et al., 2018].

Ahora bien, un componente óptico supera las especificaciones de la ISO 10110 mediante el

método de inspección visual si supera las siguientes condiciones:

- No pueden existir defectos con un *grade number* mayor al especificado en la hoja de datos del componente.
- El área del componente óptico cubierta por defectos ‘relevantes’² ($A_{defectos}$) no puede superar el valor de la siguiente expresión:

$$A_{defectos} = N_p \cdot A_g^2 \quad (1.4)$$

Por ejemplo, la especificación 5/5x0.05 brindada por un cierto fabricante, indica que el componente no puede tener defectos de un *grade number* mayor a 0.05, que no puede tener más de 5 defectos de *grade number* igual a 0.05 (diámetro de 50 micrones) y que el área máxima cubierta por los defectos con un *grade number* mayor ó igual al mínimo valor especificado por el fabricante no puede superar el valor de 12500 μm^2 .

■ 1.2 Características del filtro

El componente óptico analizado en la presente tesis, denominado en adelante filtro, consiste de un arreglo de cinco filtros ópticos de interferencia considerados en adelante a cada uno de ellos como una banda. En la Figura ?? se muestran las dimensiones del filtro especificadas por el fabricante y en la Figura ?? se muestra una imagen del filtro analizado.

²Por defectos ‘relevantes’ se considera a los defectos de *grade number* mayor al defecto de mínimo *grade number* detectado vía inspección visual. De acuerdo a la ISO 14997 que es una implementación de los métodos de control de calidad especificados por la ISO 10110-7, el *grade number* del defecto más chico a considerar vía la inspección visual es de un *grade number* igual a 0.040 (40 μm de diámetro) [Etzold et al., 2016]. Ahora bien, el fabricante podría indicar que los defectos de mínimo diámetro que detecta vía inspección visual son de otro *grade number*, por ejemplo 0.016 (16 μm de diámetro).

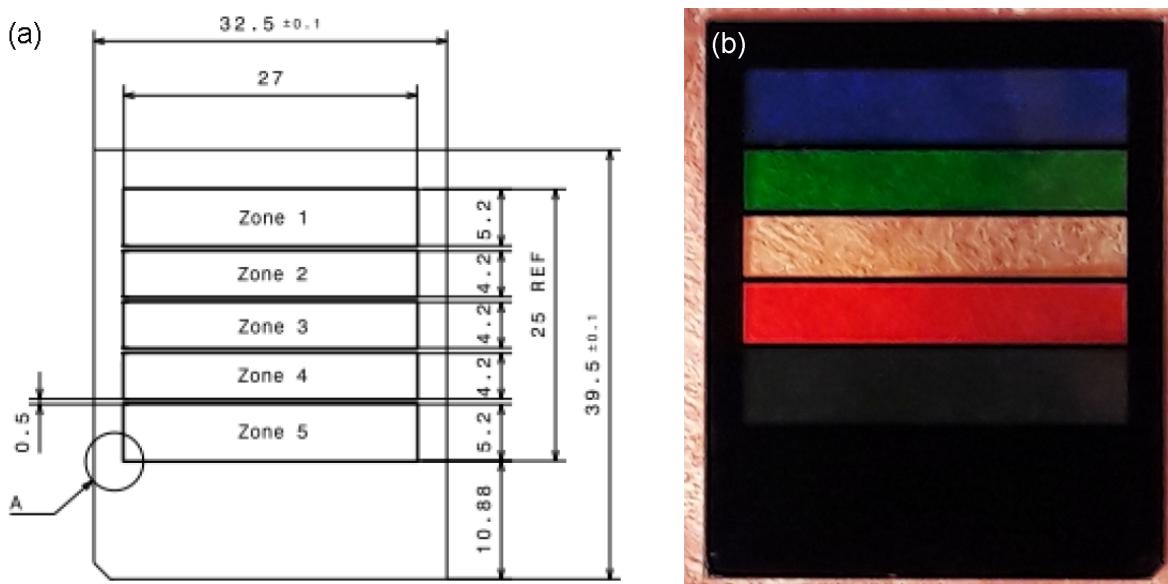


Figura 1.4: (a) Dimensiones del filtro especificadas por el fabricante. (b) Imagen del filtro analizado.

Las zonas (en inglés, *zone*) están asociadas a una cierta bandapectral de transmisión de la siguiente manera:

- Zona 1 - Banda Azul: (450-510) nm
- Zona 2 - Banda Verde: (510-580) nm
- Zona 3 - Banda Pancromática³: (450-750) nm
- Zona 4 - Banda Roja: (590-690) nm
- Zona 5 - Banda NIR: (750-900) nm

Las especificaciones ópticas de calidad de cada banda del filtro brindadas por el fabricante fueron las siguientes: $5/2 \times 0.063$ (*S/D 20-10, according to MIL PRF 13830*). Estas especificaciones implican para el caso de la ISO 10110, $5/2 \times 0.063$, que en la superficie óptica de cada banda puede haber un máximo de 2 defectos de *grade number* igual a 0.063 ($63 \mu\text{m}$ de diámetro), que no puede haber defectos con un *grade number* mayor a 0.063 y que el

³La palabra pancromática, del griego ático donde pan significa todo y cromático viene de la familia de la palabra color, implica que dicha banda tiene un espectro de transmisión en toda la región del visible.

área total máxima cubierta por defectos de *grade number* mayor ó igual al mínimo valor especificado por el fabricante puede ser de $7938 \mu\text{m}^2$, de acuerdo a 1.4. Y, las especificaciones de *scratch & dig*, S/D 20-10, indican que en cada banda puede haber rayaduras con un brillo calibrado de *scratch number* igual 20 y que la suma de todas las longitudes de las rayaduras del mismo valor de *scratch number* no podrá ser superior al diámetro equivalente de cada banda, de acuerdo a 1.1. Por último, cada banda del filtro no deberá tener más de 1 defecto de *dig number* igual a 10 (diámetro de $100 \mu\text{m}$) de acuerdo a 1.2⁴ y la suma de los diámetros de todos los defectos no podrá ser superior a los 0.2 mm, de acuerdo a 1.3.

La hoja de datos del filtro provista por el fabricante no especificó el método de inspección utilizado para garantizar la calidad óptica del filtro de acuerdo a la normativa ISO 10110. Ahora bien, como aplicación se va a suponer que el fabricante realizó únicamente una inspección visual con muestras calibradas para garantizar la calidad óptica de sus componentes.

Se hace notar que entre las bandas se encuentran unas regiones rectangulares de un material denominado por el fabricante como cromo negro, de $(0.5 \pm 0.1) \text{ mm}$ de longitud como se muestra en la Figura ???. El cromo sirve para aislar espectralmente a cada par de bandas contiguas entre sí del filtro por lo que reduce el potencial *cross-talk*⁵ en el sensor de imagen. El mismo material cubre toda la región del filtro no contenida por las cinco bandas.

1.3 Adquisición de las imágenes del filtro

Con el propósito de cuantificar y caracterizar los defectos del filtro se adquirieron imágenes microscópicas del mismo. Para la adquisición de las imágenes se utilizó un microscopio invertido Zeiss Axio Observer Z1 como se muestra en la Figura 1.5 (a), con un objetivo Zeiss N-Achroplan de magnificación 10X y apertura numérica de 0.25. Las imágenes del filtro fueron adquiridas por transmisión utilizando una fuente de luz blanca, en condiciones de *bright field*⁶.

⁴Las dimensiones de la banda más chica son de 4.2 mm x 27.0 mm con lo cual el diámetro equivalente es de aproximadamente 12 mm. El cociente de la Ecuación 1.2 es igual a 0.6, resultado que se trunca a 1. El resultado final es el mismo para todas las bandas.

⁵El *cross-talk* sería la intromisión del espectro de transmisión de una banda en la detección del espectro de su banda contigua.

⁶Técnica de iluminación que en castellano suele ser denominada de campo brillante para diferenciarla de la iluminación de campo oscuro (en inglés *dark field*, ver [Wikipedia, 2020]).

La cámara monocromática del microscopio del fabricante Zeiss, modelo Axiocam 702, con un sensor CMOS de 1/1.2" (diagonal de 13.3mm) y una resolución de 2.3 megapíxeles (1216x1920 píxeles), fue controlada a través del software ZEN 2.5 (*Blue edition*, 2018) del mismo fabricante. Se utilizó la calibración de la cámara que viene de fábrica del microscopio para la configuración utilizada, donde 1 píxel equivale a $0.586 \mu m$. Cada imagen individual tiene las dimensiones del *field of view* (FOV) de la cámara, que son de $713 \mu m \times 1125 \mu m$.

Se configuró el software para adquirir las imágenes por transmisión, en particular se eligió la fuente de luz blanca y para cada medición su intensidad, además del tiempo de exposición de la cámara. Se montó el filtro sobre el portamuestras de la platina del microscopio como se muestra en la Figura 1.5 (b) y con las perillas manuales del microscopio se puso en foco la imagen observando la adquisición en vivo en la computadora.

1. Cuantificación de los defectos

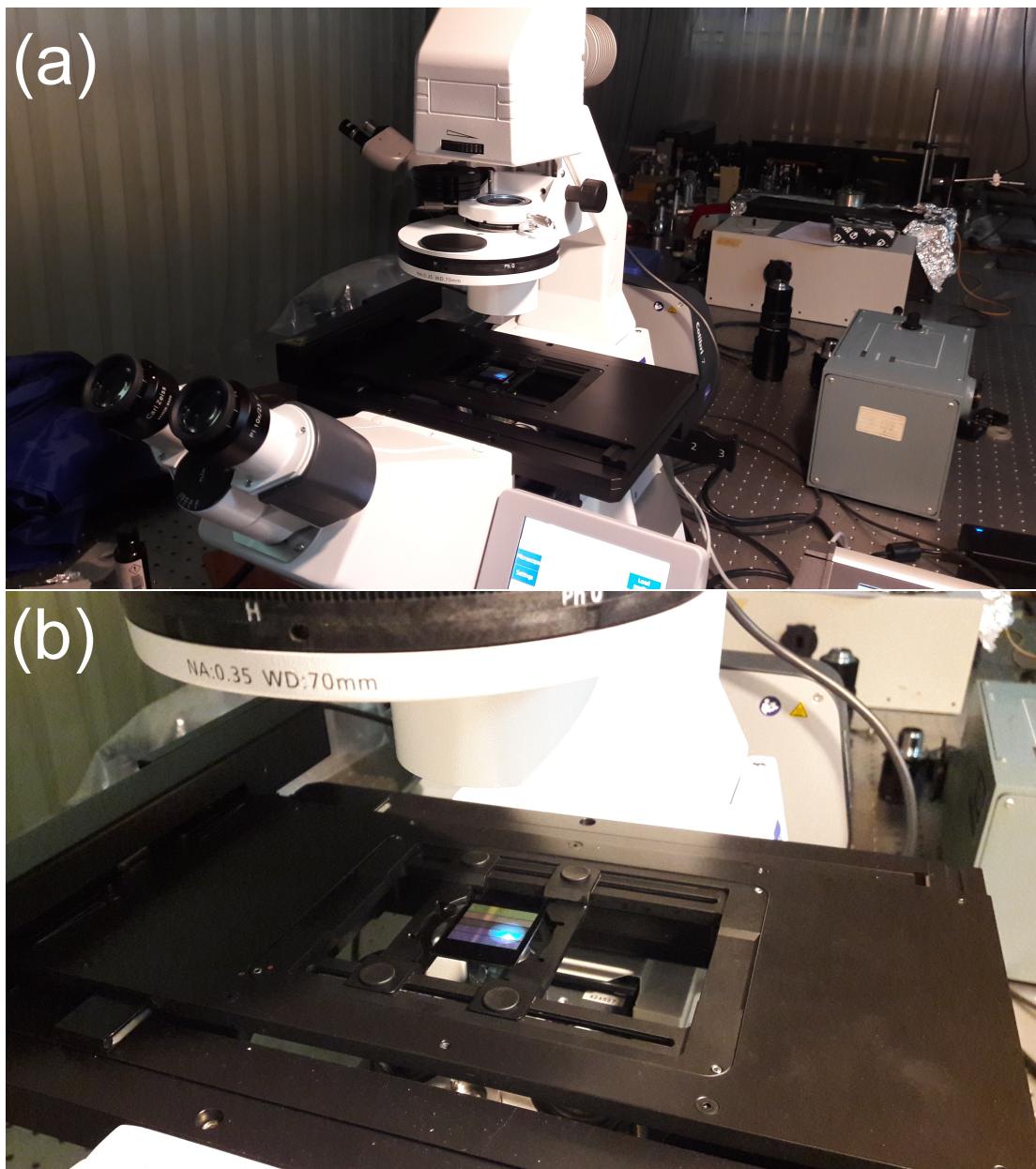


Figura 1.5: (a) Microscopio invertido Zeiss Axio Observer Z1. (b) Montaje del filtro sobre el portamuestras de la platina del microscopio.

■ 1.3.1 Adquisición de imágenes de microscopía por el método de *Tile scan*

Se adquirieron imágenes de microscopía para una determinada región del filtro, ya sea para el filtro completo a excepción de la banda del NIR ó para cada banda espectral del filtro en particular. La palabra en inglés *tile* significa baldosa en castellano y realizar un *tile scan*

implica realizar un barrido de adquisición de imágenes de una cierta área a elección de una muestra donde el área total a adquirir está compuesta por múltiples baldosas. Cada baldosa, es decir cada *tile* constituye una imagen del microscopio de acuerdo al *field of view* (FOV) que se tiene del arreglo óptico de la cámara integrada al microscopio. En la Figura 1.6 se muestra un ejemplo de un *tile scan* de la banda pancromática del filtro.

Se eligió la región total a adquirir a partir de la selección visual individual de las cuatro esquinas de la misma, es decir las posiciones $[0,0]$, $[xf,0]$, $[0,yf]$, $[xf,yf]$ de acuerdo al sistema de coordenadas de la Figura 1.6. Para elegir estas esquinas el microscopio cuenta con un *joystick* que permite mover la platina motorizada del microscopio en el plano de la imagen y se tiene activada la adquisición en vivo en el software ZEN para elegirlas visualmente.



Figura 1.6: *Tile scan* de la banda pancromática.

Entre otros parámetros del barrido, se eligió el *overlap* entre las baldosas, es decir la superposición entre las mismas que luego permite obtener una imagen completa individual para su visualización, realizando un *stitching*⁷ como post-procesamiento de las imágenes. Este último procedimiento también fue realizado con el software de Zeiss. Por último, se elige en la configuración que cada baldosa de la región barrida sea exportada como una imagen individual para su posterior análisis.

Cada trayectoria del barrido fue realizada automáticamente de la siguiente manera: la platina motorizada se posicionó en el centro del FOV de la primera *tile* a adquirir asociada a las coordenadas $[0,0]$ de la imagen de la Figura 1.6 y se adquirió la primera imagen individual del barrido completo de la región a adquirir, en este ejemplo la banda pancromática. A continuación la platina motorizada se desplazó en el sentido definido positivo del eje *x* hasta

⁷El *stitching* es el proceso computacional por el cual se combinan múltiples *tiles* para producir una sola imagen que permita una mejor visualización (Ver técnica SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), [Lowe, 1999]).

el centro del FOV de la segunda *tile* a adquirir teniendo en cuenta el *overlap* configurado y así siguiendo una trayectoria que barre por ‘filas’ completas a lo largo del eje *x* que van variando con el desplazamiento discreto vertical en el eje *y* cuando se llega a los extremos del eje *x*.

■ 1.3.2 Superficies y mapa de los defectos del filtro

Se adquirieron imágenes completas del filtro, para las dos superficies exteriores del filtro como se muestra en las Figuras 1.7 (a) y 1.7 (b).

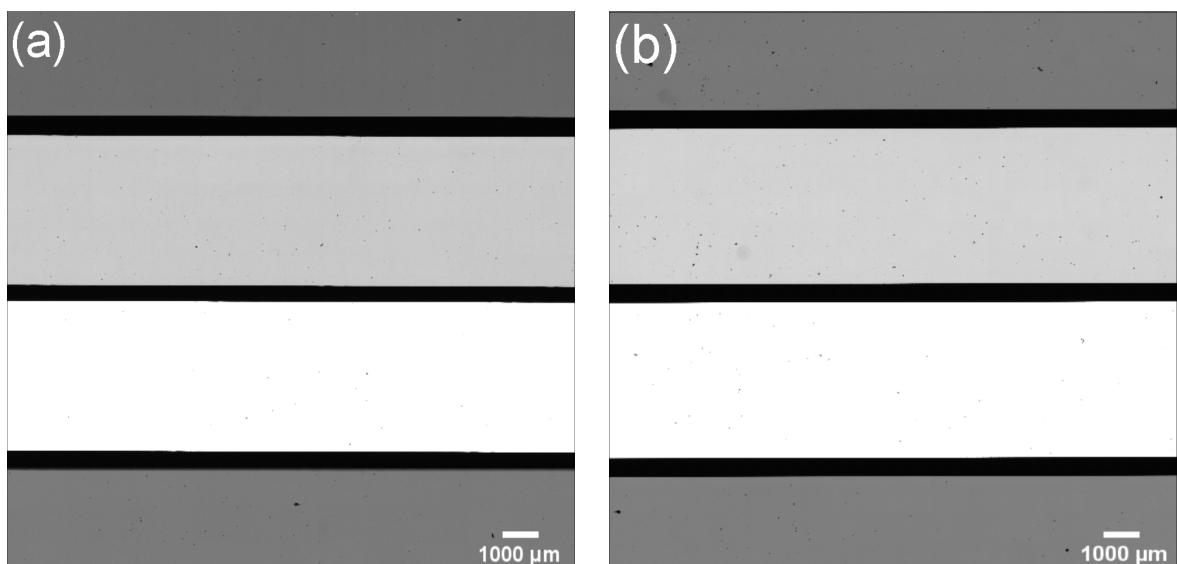


Figura 1.7: (a) Imagen de la superficie exterior A del filtro, resultado del *stitching* de las imágenes de un barrido de 15.54 mm x 14.94 mm. (b) Imagen de la superficie exterior B del filtro, resultado del *stitching* de las imágenes de un barrido de 15.50 mm x 15.55 mm.

En las Figuras 1.7 (a) y 1.7 (b) se muestran las bandas espectrales del filtro en orden descendente: Azul (450-510 nm), Verde (510-580 nm), Pancromática (450-750 nm), Roja (590-690 nm). El *overlap* configurado entre las *tiles* fue de 30%. El brillo, el contraste y el tamaño de las imágenes originales fueron modificados para obtener una mejor visualización, utilizando el software FIJI-ImageJ [Schindelin et al., 2012].

Para realizar el barrido completo de cada superficie se verificó en las cuatro esquinas de la superficie a medir que no se pierda el foco de la imagen. Se eligió la intensidad de la fuente de luz y el tiempo de integración de la cámara tales que no sature alguna de las bandas del filtro

de forma tal poder adquirir una imagen completa del filtro en un solo barrido, y de forma tal que se utilice la mayor parte del rango dinámico de la cámara.

Se hace notar que la banda del NIR no pudo ser adquirida en el barrido completo de las superficies exteriores del filtro pues con los valores de intensidad de la lámpara y del tiempo de adquisición de la cámara fijados para que ninguna de las bandas del filtro sature, no era posible obtener una imagen de esa banda con una buena relación señal-ruido. Si bien la cámara tiene un rango de sensibilidadpectral comprendido entre los 350 nm y los 1000 nm [Zeiss, 2014], del gráfico de la eficiencia cuántica⁸ se desprende que para la región spectral del NIR tiene una eficiencia cuántica menor al 30% (Ver Figura 1.8). A esto se le suma el hecho de que la fuente de luz tiene un espectro de emisión centrada en el ultravioleta y con una fuerte componente del espectro visible pero de muy baja intensidad en la región del NIR, como se muestra en el gráfico de la intensidad en función de la longitud de onda de la Figura 1.9. Dicho espectro fue medido con el espectrómetro CCS200 de Thorlabs y se hace notar que dicha fuente de luz es utilizada con muestras biológicas. Ahora bien, la banda spectral del NIR fue medida individualmente posteriormente como se muestra en la Sección 1.3.3.

Como criterio de diseño y construcción de un equipo de microscopía para inspeccionar los filtros como el analizado en el presente trabajo, se debería considerar para la adquisición de la banda del NIR una fuente de luz infrarroja y una cámara con una respuesta spectral específica de dicha región del espectro. Y, para el resto de las bandas se podría utilizar una fuente de luz de banda ancha en la región del espectro visible como la que se utilizó en el montaje del equipo desarrollado que se explica en el Capítulo ??.

⁸La eficiencia cuántica, en inglés *Quantum efficiency* (QE), es una medida de la sensibilidad de un dispositivo fotosensible que permite determinar como es la respuesta del dispositivo para cada longitud de onda.

1. Cuantificación de los defectos

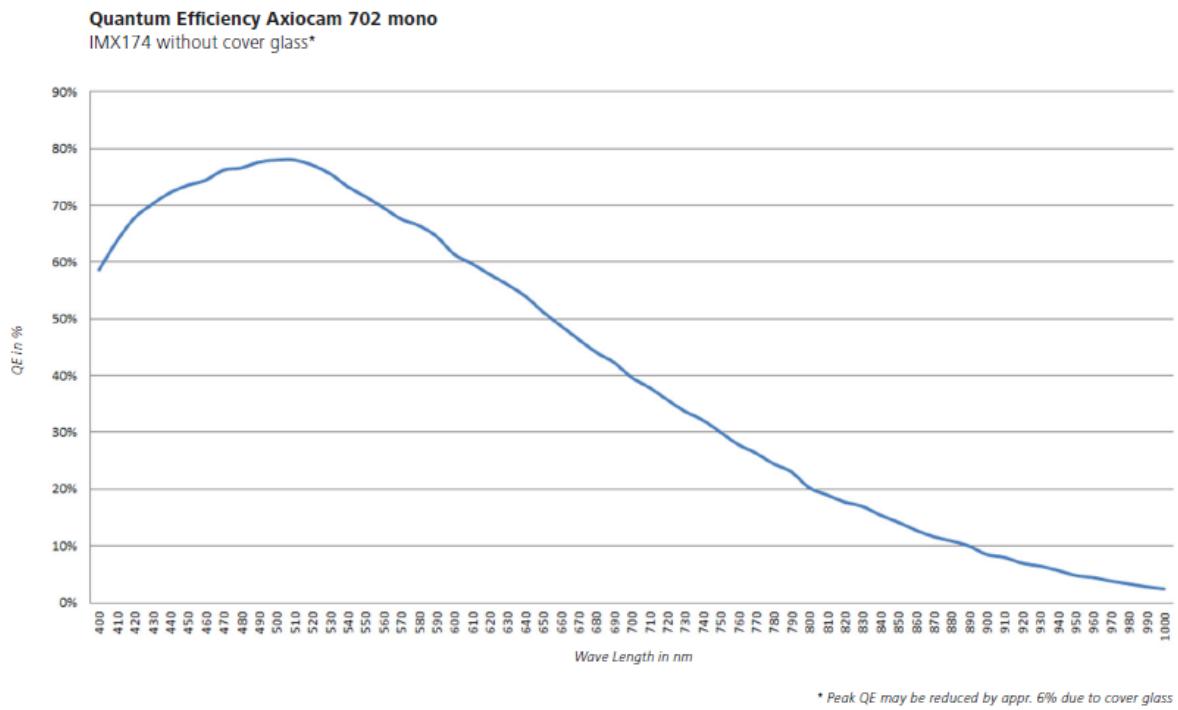


Figura 1.8: Gráfico de la eficiencia cuántica de la cámara monocromática del microscopio Axiocam 702 en función de la longitud de onda. Adaptado de [Zeiss, 2014].

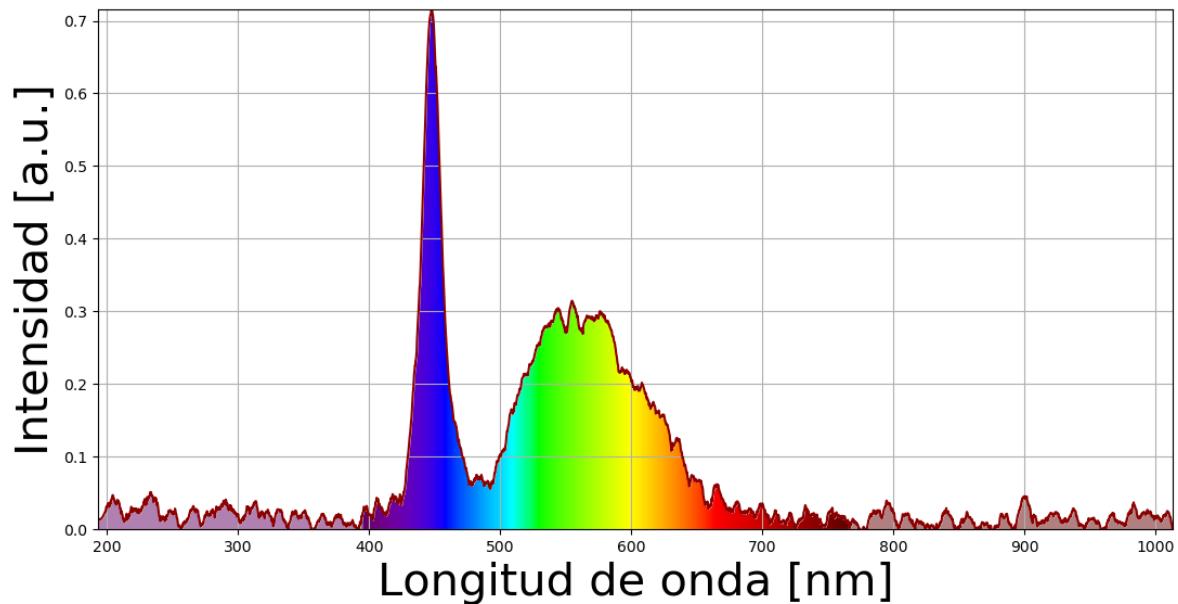


Figura 1.9: Espectro de emisión de la fuente de luz del microscopio.

La imagen completa de cada superficie exterior del filtro permitió realizar un primer diagnóstico visual general por imagen de la calidad óptica de construcción del filtro. Además,

permitió obtener un mapa de los defectos con su ubicación precisa en la superficie del filtro para ser utilizado luego con el microespectrómetro (Ver Capítulo ??). Por último, se midió la longitud del cromo que separa las bandas con el software Fiji para realizar la calibración de la platina que se explica en la Sección ??.

■ 1.3.3 Adquisición de imágenes individuales de cada bandapectral

Para realizar la cuantificación de los defectos del filtro, se adquirieron imágenes individuales de cada banda espectral para una de las superficies exteriores del filtro. Para cada banda, se configuró la intensidad de la lámpara y el tiempo de integración de la cámara de forma tal de utilizar la mayor parte del rango dinámico de la cámara que se encuentra alrededor del 70 % recomendado por el fabricante y de esta forma obtener la mejor calidad de imagen para el posterior análisis de cada banda. Así también se verificó que las cuatro esquinas de la banda a medir estuvieran en foco a partir de la visualización en vivo de la cámara. Dichas esquinas fueron elegidas en el software para determinar el área a ser barrida con el *tile scan* teniendo cuidado de no incluir parte del cromo en el campo de visión de la imagen. Esto resultó importante pues de lo contrario el algoritmo de detección de los defectos detectaba al cromo como un centenar de defectos, que serían falsos positivos⁹, lo que arruinaría claramente cualquier tipo de análisis cuantitativo. En las Figuras 1.10 a 1.14 se muestran los *tile scan* de cada banda y en sus epígrafes se detallan los parámetros de cada adquisición. No se realizó un *stitching* de las imágenes de cada banda, ya que se analizaron las imágenes individuales (Ver Sección 1.5). El *overlap* configurado entre las *tiles* de cada banda fue de 10%.

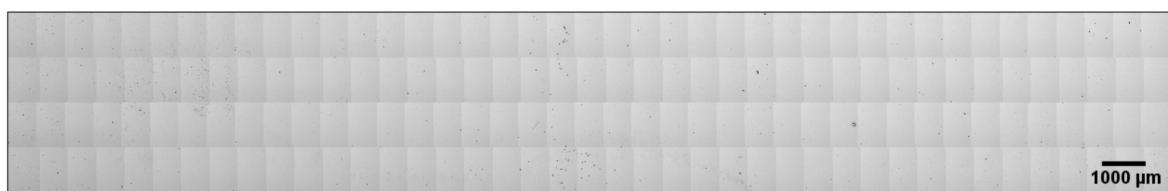


Figura 1.10: Imagen de la banda azul del filtro obtenida mediante un *Tile scan* de 26.37 mm x 4.16 mm, compuesta por 164 *tiles*, con la intensidad de la lámpara configurada en 30% y el tiempo de exposición de la cámara fue de 40 ms. No se realizó un *stitching* sobre las imágenes del barrido, ya que fueron analizadas individualmente.

⁹En el contexto de esta tesis, un falso positivo consistiría en la detección errónea mediante un algoritmo de procesamiento de imágenes de un defecto que en realidad no lo es.

1. Cuantificación de los defectos

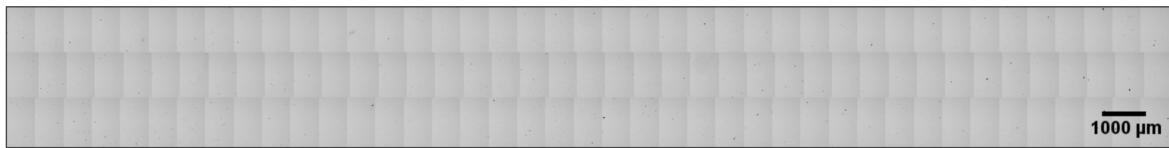


Figura 1.11: Imagen de la banda verde del filtro obtenida mediante un *Tile scan* de 26.37 mm x 3.15 mm, compuesta por 123 *tiles*, con la intensidad de la lámpara configurada en 17% y el tiempo de exposición de la cámara fue de 40 ms. No se realizó un *stitching* sobre las imágenes del barrido, ya que fueron analizadas individualmente.



Figura 1.12: Imagen de la banda roja del filtro obtenida mediante un *Tile scan* de 26.37 mm x 3.15 mm, compuesta por 123 *tiles*, con la intensidad de la lámpara configurada en 10% y el tiempo de exposición de la cámara fue de 40 ms. No se realizó un *stitching* sobre las imágenes del barrido, ya que fueron analizadas individualmente.



Figura 1.13: Imagen de la banda pancromática del filtro obtenida mediante un *Tile scan* de 27.65 mm x 3.15 mm, compuesta por 123 *tiles*, con la intensidad de la lámpara configurada en 27% y el tiempo de exposición de la cámara fue de 15 ms. No se realizó un *stitching* sobre las imágenes del barrido, ya que fueron analizadas individualmente.

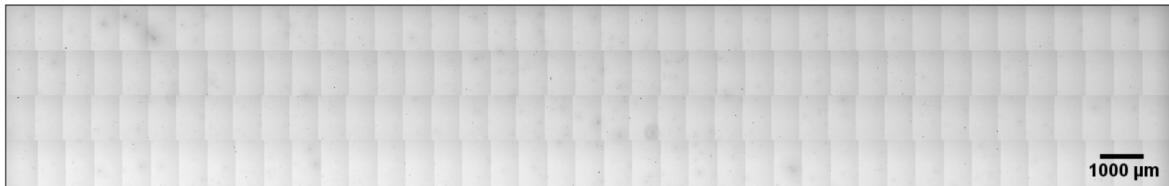


Figura 1.14: Imagen de la banda NIR del filtro obtenida mediante un *Tile scan* de 26.37 mm x 4.16 mm, compuesta por 164 *tiles*, con la intensidad de la lámpara configurada en 50% y el tiempo de exposición de la cámara fue de 150 ms. No se realizó un *stitching* sobre las imágenes del barrido, ya que fueron analizadas individualmente.

La adquisición de las imágenes de cada banda considerando el tiempo de seleccionar el área a adquirir, la elección de los parámetros de adquisición, etc. tuvo una duración de aproximadamente 10 minutos por banda. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones respecto de los formatos de las imágenes y de los tipos de datos así como su precisión:

- Cada barrido completo de una banda es guardado por el software de Zeiss en un archivo de extensión .czi que contiene toda la *metadata* como la información referida a la configuración del microscopio utilizada. Dicho archivo puede ser manipulado con el software de Zeiss, ó con el Fiji-ImageJ (distribución del software ImageJ con *plugins*) ó a través del lenguaje *python* utilizando la librería *czifile*¹⁰.
- El archivo .czi de la banda completa además contiene todas las *tiles* del barrido que pueden ser exportadas como archivos individuales utilizando las herramientas de procesamiento del software de Zeiss [Zeiss, 2016]. Es muy importante exportar dichas imágenes eligiendo un formato de imagen (.tiff ó .png) que no modifique la calidad de la imagen original, esto es, que no se pierda precisión sobre los valores de intensidad de cada píxel.

1.4 Iluminación no uniforme del microscopio

La eficiencia en la aplicación de un algoritmo de segmentación¹¹ de defectos en las imágenes individuales de cada banda adquiridas depende fuertemente de la distribución de los valores de intensidad de una imagen que permiten distinguir a los defectos del fondo de la imagen.

Las imágenes de microscopía pueden estar afectadas por las variaciones de intensidad debido a las imperfecciones inherentes del proceso de formación de imágenes. Estas variaciones de intensidad pueden venir dadas por la iluminación no uniforme de la muestra, por la orientación misma de la muestra al montarla sobre la platina del microscopio ó por el efecto de *vignetting* que se materializa con la aparición de bordes negros en las imágenes y que es propio de la configuración del sensor de la cámara. Estos efectos pueden dar lugar a falsos positivos en el proceso de segmentación de los defectos, lo que constituye un grave problema a solucionar (Ver Sección 1.6).

La desalineación de alguno de los componentes que se encuentran en el camino óptico entre la fuente de luz y el sensor de la cámara con el que se adquieren las imágenes (Ver Figura 1.15 (a)), es una causa muy importante de la iluminación no uniforme de la muestra que se está

¹⁰Ejemplo sencillo:  2.3.3.

¹¹En el contexto de la presente tesis, el término segmentación hace referencia a la identificación individual de cada defecto presente en una imagen.

analizando. En la Figura 1.15 (b) se puede observar un ejemplo de una imagen microscópica adquirida con una iluminación no uniforme.

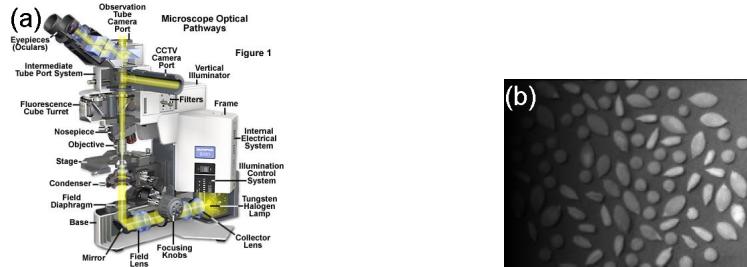


Figura 1.15: (a) Camino óptico de la luz desde su fuente de emisión hasta la detección en el sensor de una cámara digital [Mortimer Abramowitz, 2020]. (b) Ejemplo de imagen de microscopía con una iluminación no uniforme.

Una imagen de microscopía adquirida idealmente con una iluminación uniforme tendría una imagen de fondo (*background image*) como la que se muestra en la Figura 1.16 (a). La imagen de fondo es una imagen que contiene en cada píxel la información de la iluminación del microscopio bajo ciertas condiciones de intensidad de la fuente de luz y del tiempo de integración del sensor de la cámara utilizado. Experimentalmente, dicha imagen puede ser obtenida colocando un portaobjeto sin la muestra, en las mismas condiciones de iluminación y foco (misma distancia muestra-objetivo). Si dicha imagen de fondo experimental no pudiera ser adquirida pero se cuenta con un gran número de imágenes adquiridas bajo las mismas condiciones experimentales, una imagen de fondo puede ser generada tomando la mediana del conjunto de imágenes como se explica en la subsección 1.5.1.

Para medir la uniformidad de la iluminación se utilizan los histogramas de las imágenes. Una imagen monocromática es manipulada computacionalmente como una matriz donde cada elemento de la matriz representa el valor de intensidad de dicho píxel asociado. El histograma de una imagen es la representación de la distribución de los valores de intensidad de la misma y se lo define como el número de píxeles presentes en una imagen con un cierto valor de intensidad.

En la Figura 1.16 (a) se muestra una imagen de fondo ficticia que tendría una iluminación ideal uniforme, sin problemas de *vignetting* y sin considerar el ruido de Poisson de fotones. Dicha imagen tiene un histograma como el que se muestra en la Figura 1.16 (b), en el que se

puede observar que todos los píxeles de la imagen tienen el mismo valor de intensidad, lo que demuestra que el fondo es perfectamente homogéneo.

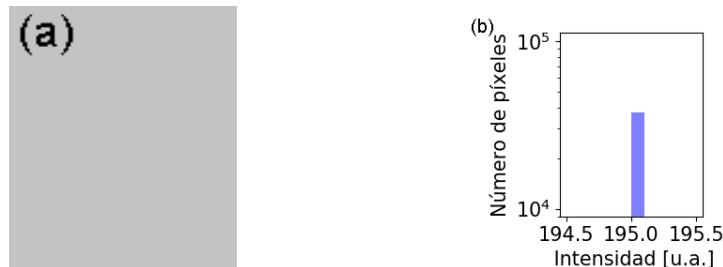


Figura 1.16: (a) Imagen de fondo con una iluminación uniforme ideal y sin problemas de *vignetting*. (b) Histograma de la intensidad de los píxeles de la imagen de fondo ideal.

En adelante, el fondo de cada imagen será denominado el *background* de la imagen, para diferenciarlo de los defectos que se encuentran en lo que en adelante se llamará el *foreground* de la imagen. Para resaltar la importancia de la corrección de la iluminación no uniforme y del *vignetting*, supongamos una imagen ficticia de alguna banda del filtro analizado en la presente tesis, adquirida con una iluminación de fondo uniforme ideal y sin problemas de *vignetting*, donde se puedan observar dos defectos en color negro (Ver Figura 1.17 (a)).

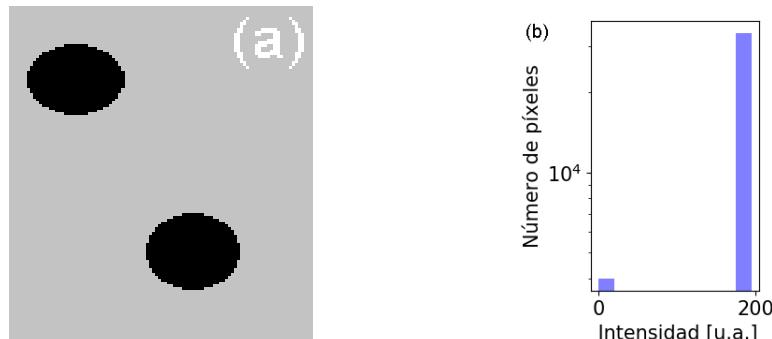


Figura 1.17: (a) Imagen con dos defectos con una iluminación uniforme ideal y sin problemas de *vignetting*. (b) Histograma de la intensidad de los píxeles de la imagen con dos defectos con una iluminación uniforme ideal y sin problemas de *vignetting*.

En la Figura 1.17 (b) se muestra el histograma de la intensidad de los píxeles de la imagen con dos defectos con una iluminación uniforme ideal y sin problemas de *vignetting*. En dicho histograma se distingue de forma binaria el *foreground* (defectos) con valores de intensidad iguales a 0, del *background* con valores de intensidad iguales a 195. Bajo estas condiciones ideales, la segmentación de los defectos puede ser realizada de inmediato eligiendo cualquier

umbral de intensidad que se encuentre entre el *foreground* y el *background*.

1.5 Pre-procesamiento de las imágenes de cada banda espectral

El análisis de las imágenes fue realizado sobre cada *tile* individual del barrido completo de una banda, dado que su tamaño típico es de 3 MB por lo que el procesamiento en la computadora es mucho más rápido que el de analizar las imágenes de una banda completa¹², de tamaños típicos de 1 GB ó del filtro completo que tienen más de 5 GB.

El pre-procesamiento de las imágenes individuales de cada banda espectral consistió en la corrección de la iluminación no uniforme del microscopio. Dicha corrección fue realizada a partir de la normalización de las imágenes individuales del barrido con una imagen de fondo [Nordenfelt et al., 2018].

1.5.1 Generación de la imagen de fondo: Q_{2.5.1}

Se construyó computacionalmente la imagen de fondo de cada banda a partir de tomar la mediana para cada píxel de todas las imágenes individuales adquiridas de la banda. Esta imagen de fondo contiene la información de la no uniformidad de la iluminación del microscopio. Dicha imagen debe ser generada para cada banda en particular ya que cada una de las bandas fue adquirida en ciertas condiciones de intensidad de la fuente de luz y del tiempo de integración de la cámara.

En la Figura 1.18 (a) se muestra la imagen de fondo generada para la banda azul, cuya intensidad de la fuente de luz fue configurada en 30% y el tiempo de integración de la cámara fue de 40 ms. Los dos discos concéntricos que podrían ser anillos de difracción, recuadrados en color azul en la imagen, son resultado de algún defecto del microscopio, ya advertido por otros usuarios del equipo. Dichos discos fueron observados en la adquisición de las cinco bandas.

¹²Vale aclarar que las imágenes completas ya sea de una banda ó las del filtro completo, fueron el resultado de realizar un *stitching* de todas las *tiles* individuales de cada adquisición y, fueron procesadas de esta manera simplemente para optimizar su *visualización* pero no para realizar el análisis ni detección de defectos sobre las mismas.

Al mismo tiempo, se observa en la imagen de fondo de la Figura 1.18 (a) que la iluminación del microscopio no es idealmente uniforme sino que presenta un rango de valores de intensidad que contienen píxeles más brillantes (extremo superior izquierdo) en conjunto con píxeles más oscuros (extremo inferior derecho). Esto último puede ser el efecto de alguna desalineación de la configuración del microscopio.

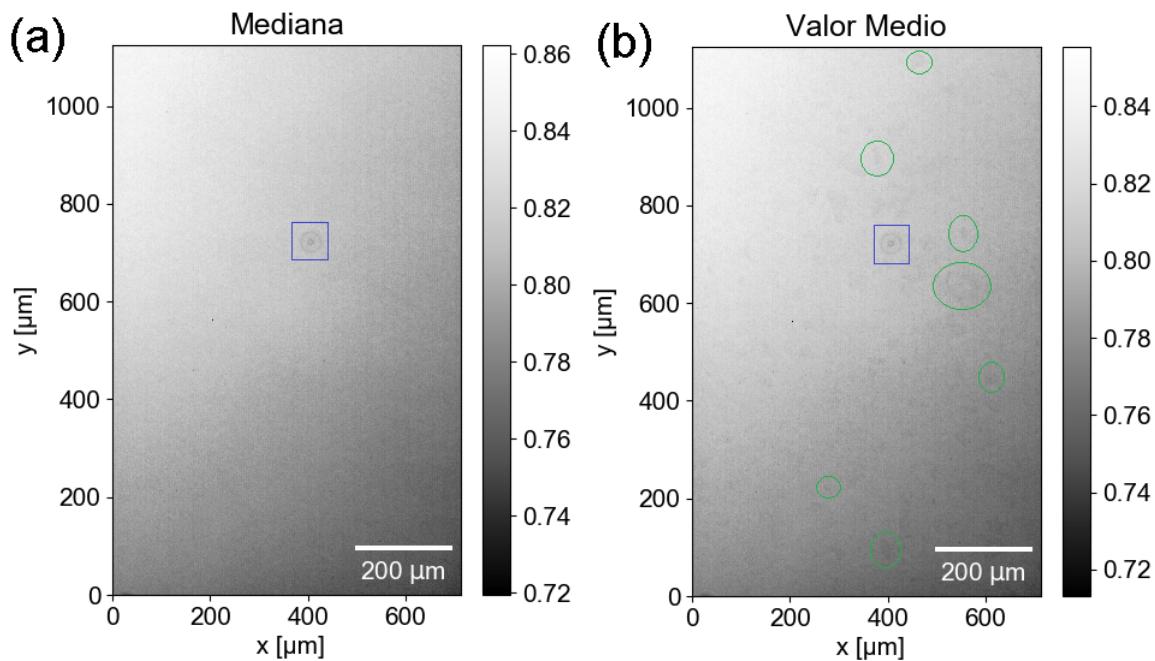


Figura 1.18: (a) Imagen de fondo de la banda azul del filtro obtenida tomando la mediana para cada píxel de todas las imágenes del barrido. (b) Imagen de fondo de la banda azul del filtro obtenida tomando el valor medio para cada píxel de todas las imágenes del barrido. Se redondearon en color verde las manchas que representan los *outliers* de la imagen.

En la Figura 1.19 se muestran los histogramas de la intensidad de los píxeles de las imágenes de fondo generadas a partir de tomar la mediana y el valor medio. En la misma figura se graficaron las curvas de densidad de la intensidad estimadas a partir de los datos originales. Se observa que la imagen de fondo generada con el valor medio tiene una mayor cantidad de píxeles más oscuros que la imagen de fondo generada con la mediana. Los valores atípicos (en inglés *outliers*) de intensidad influencian enormemente el valor medio de los datos. Dichos *outliers* pueden observarse como manchas presentes (algunas redondeadas en color verde) en la imagen de fondo generada a partir del valor medio de la Figura 1.18 (b). En la curva de densidad esto se refleja en el hecho de que la curva del valor medio tiene una mayor concentración en valores de intensidades más chicos que la curva de la mediana. Ahora bien,

1. Cuantificación de los defectos

la curva de densidad de la imagen de la mediana muestra que la generación de la imagen de fondo tomando la mediana es una forma exitosa de evitar incluir los *outliers* en la imagen. Resulta fundamental deshacerse de estos *outliers* en la imagen de fondo para no corromper las imágenes individuales originales del barrido. Esto es, si se utilizara la imagen de fondo del valor medio para corregir la iluminación no uniforme en las imágenes individuales, las mismas tendrían luego los *outliers* presentes lo cual sería catástrofico para la aplicación del algoritmo de segmentación de los defectos.

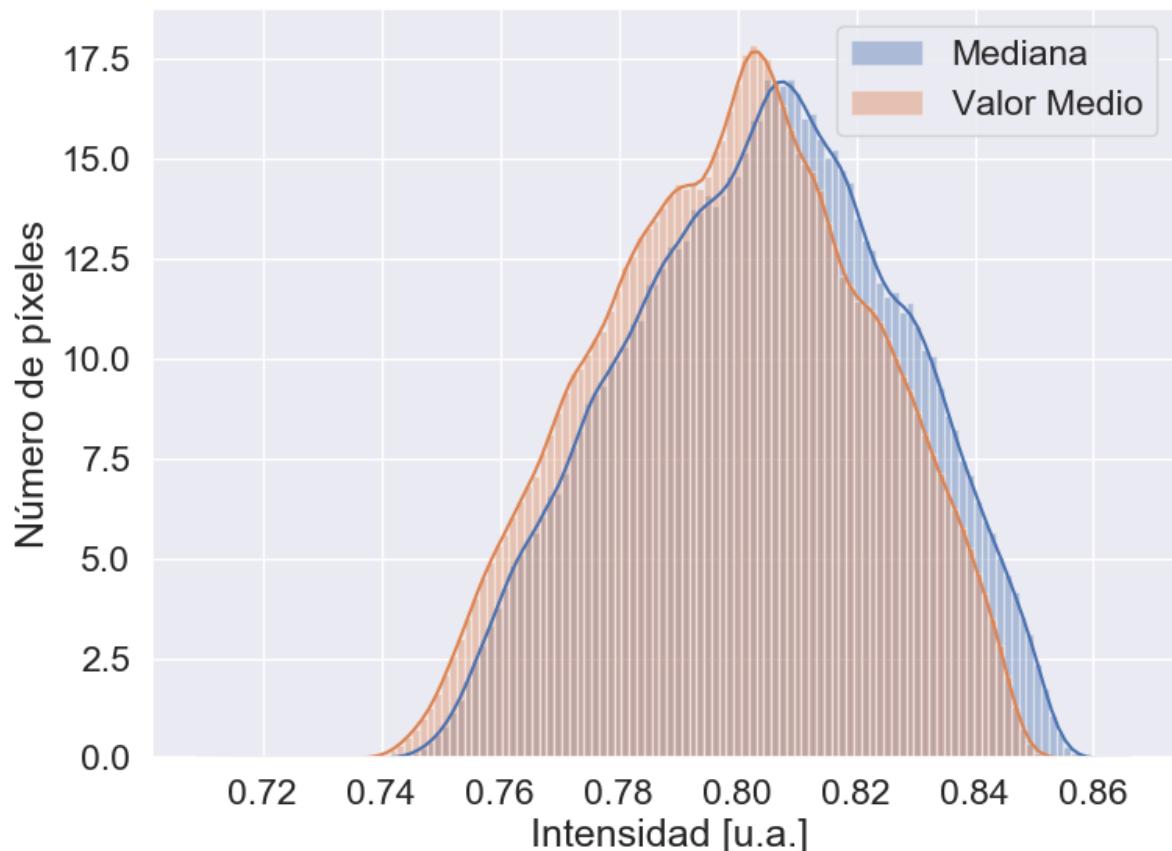


Figura 1.19: Histogramas de las imágenes de fondo de la banda azul del filtro generadas a partir de tomar el valor medio y la mediana para cada píxel del conjunto de imágenes de la banda. El eje vertical se encuentra normalizado por el máximo valor de la frecuencia de píxeles para un cierto valor de intensidad.

1.5.2 Corrección de la iluminación no uniforme de las imágenes individuales del barrido de una banda con la imagen de fondo Q_{2.5.2}

Con la imagen de fondo de cada banda ya generada, se corrigió la iluminación no uniforme del microscopio [Nordenfelt et al., 2018] y se eliminaron los anillos de difracción presentes en todas las imágenes (anillos de difracción de la de la Figura 1.18 (a)).

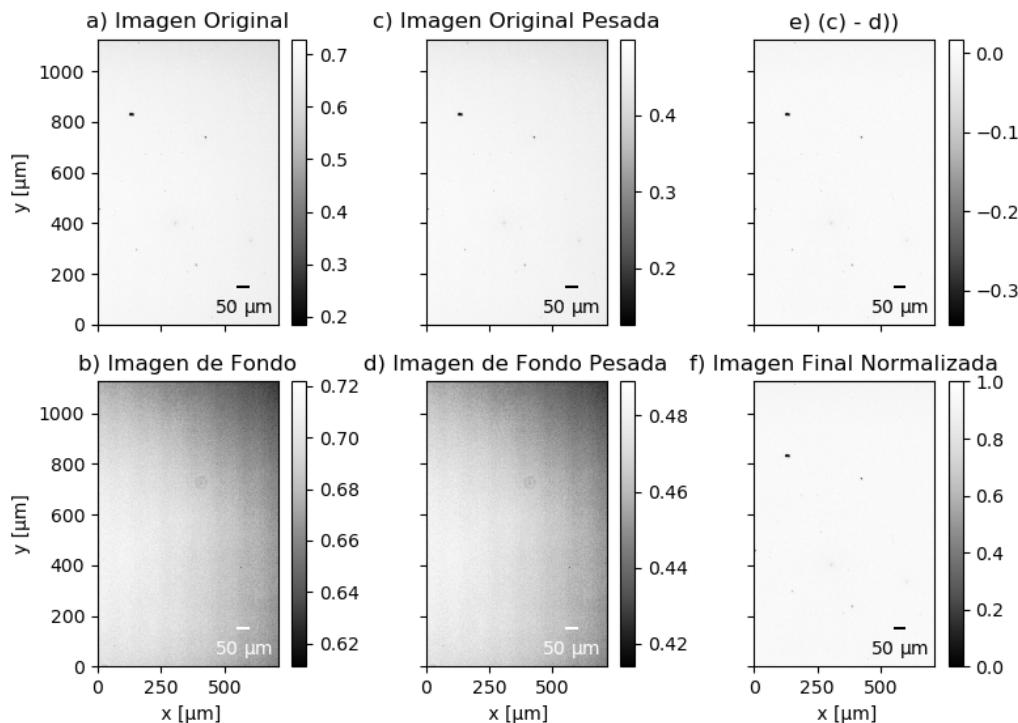


Figura 1.20: Imágenes del proceso de corrección de la iluminación no uniforme. a) Imagen original individual de la banda NIR. b) Imagen de fondo de la banda NIR. c) Imagen original multiplicada por el valor medio de la imagen de fondo. d) Imagen de fondo multiplicada por el valor medio de la imagen original. e) Imagen resultante de la diferencia entre las imágenes c) y d). e) Imagen final normalizada resultado de la expansión del histograma de intensidades.

En la Figura 1.20 se muestran las operaciones del proceso de normalización de una imagen individual (*tile*) del barrido completo de la banda NIR. El mismo proceso fue realizado para cada imagen individual de cada banda adquirida con su respectiva imagen de fondo, de acuerdo a las siguientes operaciones:

- Se calculó el valor medio de la intensidad de la Imagen de Fondo (Ver imagen b)) y de la Imagen Original (Ver imagen a)) de una banda a normalizar, en adelante

1. Cuantificación de los defectos

$\overline{Imagen\ de\ Fondo}$ e $\overline{Imagen\ Original}$ respectivamente. Esto es, se calculó la media aritmética de todos los elementos de matriz que representan a cada imagen, que es el resultado de la división entre la suma de todos los elementos de la matriz y el número total de los mismos.

- Se multiplicó la imagen de fondo por el valor medio de la imagen individual y viceversa, es decir:

$$Imagen\ de\ Fondo\ Pesada = \overline{Imagen\ individual} \cdot Imagen\ de\ Fondo \quad (1.5)$$

$$Imagen\ Original\ Pesada = \overline{Imagen\ de\ Fondo} \cdot Imagen\ Original, \quad (1.6)$$

donde $Imagen\ de\ Fondo\ Pesada$ (Ver imagen d)) e $Imagen\ Original\ Pesada$ (Ver imagen c)) son la imagen de fondo y la imagen individual pesadas con la contribución del valor medio de la imagen correspondiente.

- Se corrigió la iluminación no uniforme de la imagen original (Ver imagen e)), cuya imagen resultante se la denomina *dif*:

$$Imagen\ Corregida = Imagen\ Original\ Pesada - Imagen\ de\ Fondo\ Pesada \quad (1.7)$$

- Finalmente, para maximizar el contraste de la imagen, es decir para aumentar el rango dinámico de la imagen, se realizó la expansión del histograma ([Jain, 1989]) que consiste en una transformación lineal para expandir el intervalo comprendido entre los valores mínimo y máximo de intensidad presentes en la imagen, a todo el rango posible entre 0 y 1 (Ver Ecuación 1.9). Para ello, se definió el mínimo valor de la intensidad en 0 (en un rango de valores de intensidad entre 0 y 1):

$$Imagen\ (e) = Imagen\ Corregida - \min(Imagen\ Corregida), \quad (1.8)$$

donde $\min(Imagen\ Corregida)$ es el mínimo valor de intensidad de la imagen $Imagen$

Corregida. A la imagen resultante *Imagen (e)* se la normalizó de la siguiente manera:

$$\text{Imagen Final Normalizada} = \frac{\text{Imagen (e)}}{\max(\text{Imagen Corregida}) - \min(\text{Imagen Corregida})} = \frac{\text{Imagen Corregida}}{\max(\text{Imagen Corregida})} \quad (1.9)$$

donde $\max(\text{Imagen Corregida})$ es el máximo valor de intensidad de la imagen *Imagen Corregida* e *Imagen Final Normalizada* es la imagen resultante del proceso de normalización.

Se hace notar que el proceso de corrección de la iluminación no uniforme y del *vignetting* resultó fundamental para poder aplicar el algoritmo de detección de los defectos, esto es para distinguir el *foreground* del *background*, como se explicó en la sección 1.4. De lo contrario, el algoritmo detectaba centenares de defectos en las regiones de iluminación no uniforme, arruinando el análisis cuantitativo.

1.6 Criterio de elección del *threshold* Q_{2.6}

Con las imágenes pre-procesadas la detección de los defectos fue realizada utilizando algoritmos de procesamientos de imágenes. En particular se utilizaron algoritmos de *thresholding* que determinan un umbral de intensidad a partir del cual se crea una imagen binaria que distingue el *background* de los defectos [Shapiro, 2002].

Para determinar el umbral de intensidad óptimo para todas y cada una de las imágenes individuales de una banda se utilizó el método *try_all_threshold* de la librería *scikit-image* del lenguaje *python* [Van der Walt et al., 2014]¹³. Dicho método permite realizar pruebas inmediatas de los umbrales más utilizados en la literatura. Se hace notar que si bien se podrían haber utilizado distintos *thresholds* para cada imagen ó para distintos conjuntos de imágenes de una misma banda, se decidió elegir un sólo método de umbral para todas y cada una de las bandas para poder automatizar la aplicación del algoritmo de detección de los defectos y de la posterior asociación de incertezas a los resultados.

El criterio de elección del método del umbral fue adoptado a partir de la inspección visual.

¹³Un resumen explicativo de cada *threshold* se puede ver en el Apéndice ??.

1. Cuantificación de los defectos

Se observó visualmente el resultado (en adelante *output*) de la aplicación de los distintos *thresholds* para cada imagen de cada banda. A continuación se muestran algunas imágenes representativas en conjunto con el *output* de la aplicación de los distintos *thresholds* para explicar el criterio de elección del umbral aplicado a todas las imágenes de todas las bandas:

1. Se descartaron los *thresholds* a partir de los cuales algunas de las imágenes binarias generadas contenían una gran cantidad de falsos positivos. Esto último resultó ser el caso de los métodos *Li*[Li and Lee, 1993], *Mean*[Glasbey, 1993] y *Otsu*[Otsu, 1979], como se puede observar en la Figura 1.21. Por el motivo contrario, es decir por no contener ningún defecto en algunas de las imágenes binarias generadas, el umbral *Minimum*[Prewitt and Mendelsohn, 1966] fue descartado.

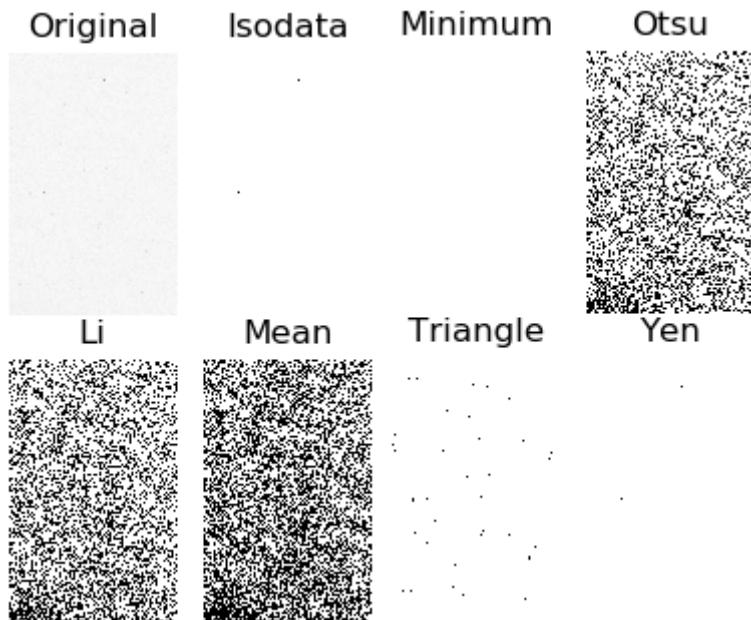


Figura 1.21: Figura del *output* del método *try_all_threshold* de la librería *scikit-image* del lenguaje *python* (Ver [Q2.6](#)).

2. Si bien en la gran mayoría de las imágenes los métodos *Isodata*[Ridler, 1978] y *Triangle*[Zack et al., 1977] no detectaban falsos positivos, el único *threshold* que no detectó ninguno falso positivo para todas las imágenes de todas las bandas fue el del método *Yen*. Esto permitió automatizar el cálculo del umbral para todas las imágenes. Por ejemplo en la Figura 1.22 se muestra una región de una imagen con 2 defectos detectados por inspección visual y el método *Yen* fue el único capaz de detectarlos de forma singular.

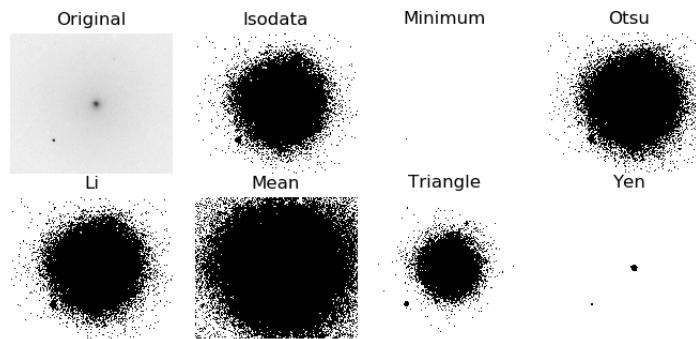


Figura 1.22: Región de una imagen individual en conjunto con el *output* del método `try_all_threshold` de la librería `scikit-image` del lenguaje `python` (Ver ).

Una vez determinado el *threshold* aplicable a todas las imágenes de todas las bandas, se desarrolló el algoritmo de detección y cuantificación de los defectos del filtro.

1.7 Algoritmo de detección y cuantificación de los defectos



En esta sección se explica el algoritmo utilizado para la detección y cuantificación de los defectos del filtro. El diagrama de flujo del algoritmo aplicado se muestra en la Figura 1.23.

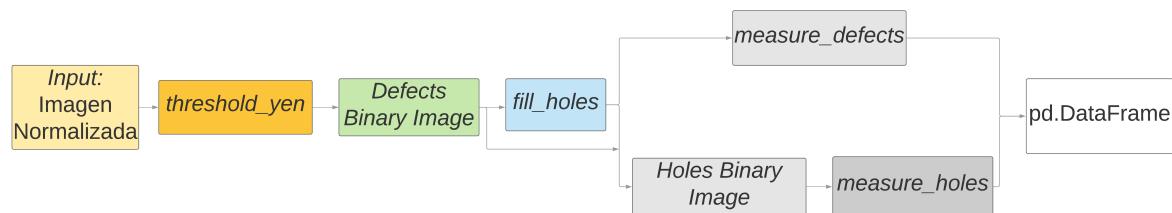


Figura 1.23: Diagrama de flujo del algoritmo de detección y cuantificación de los defectos del filtro.

1. Cuantificación de los defectos

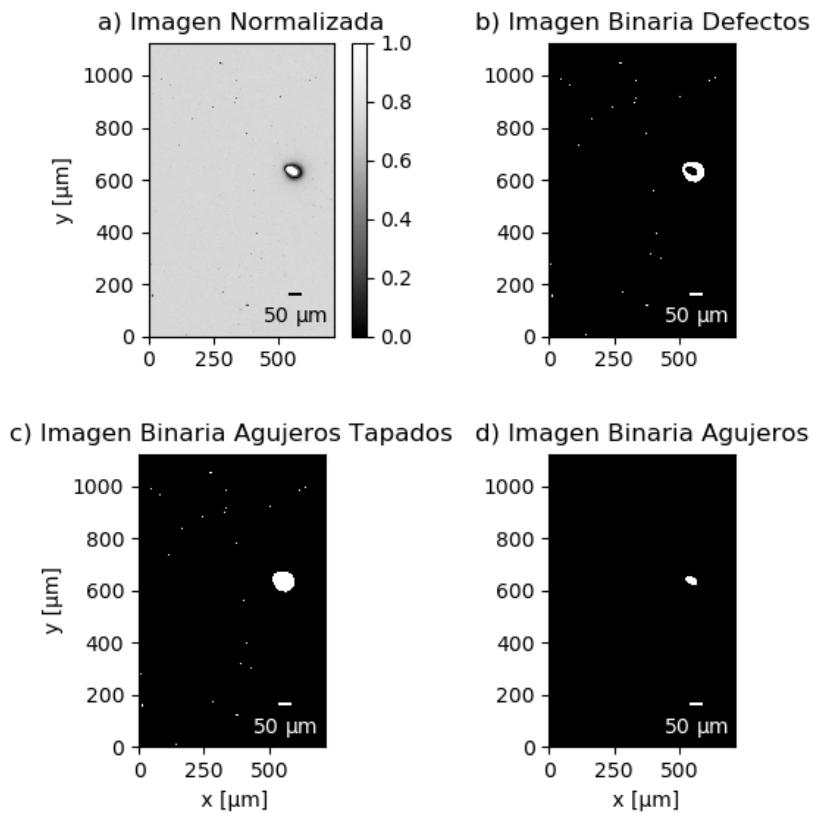


Figura 1.24: a) Imagen normalizada de la banda celeste que contiene un hueco. b) Imagen binaria generada a partir del *threshold* de Yen. c) Imagen con los huecos de la imagen b) tapados con el método *binary_fill_holes* de la clase *ndimage* de la librería *scipy* del lenguaje *python*. d) Imagen binaria con el hueco detectado.

Utilizando el diagrama de flujo de la Figura 1.23 y la Figura 1.24 como guías didácticas, se explican los pasos del algoritmo aplicado para cada imagen individual de cada banda:

1. INPUT: **Imagen Normalizada.** Se lee la imagen normalizada. En la imagen a) de la Figura 1.24 se muestra una imagen normalizada de la banda azul que contiene el hueco más grande encontrado en el filtro (caracterizado espectralmente en el Capítulo ??) y otras manchas más pequeñas. En consecuencia, la imagen es representativa de lo que sería el caso más general de la aplicación del algoritmo para detectar tanto manchas como huecos.
2. ***threshold_yen.*** Se calcula el *threshold* de Yen con el método *threshold_yen* de la librería *scikit-image*. En la Figura 1.25 se muestra el histograma de intensidad de píxeles de la imagen, con el eje vertical en escala logarítmica. La línea vertical roja indica el valor

calculado del *threshold* de *Yen* que para esta imagen de ejemplo su valor fue de 0.57. Se hace notar que dicho valor de intensidad umbral es global de toda la imagen y para cada imagen se calcula un *threshold* de *Yen* individual.

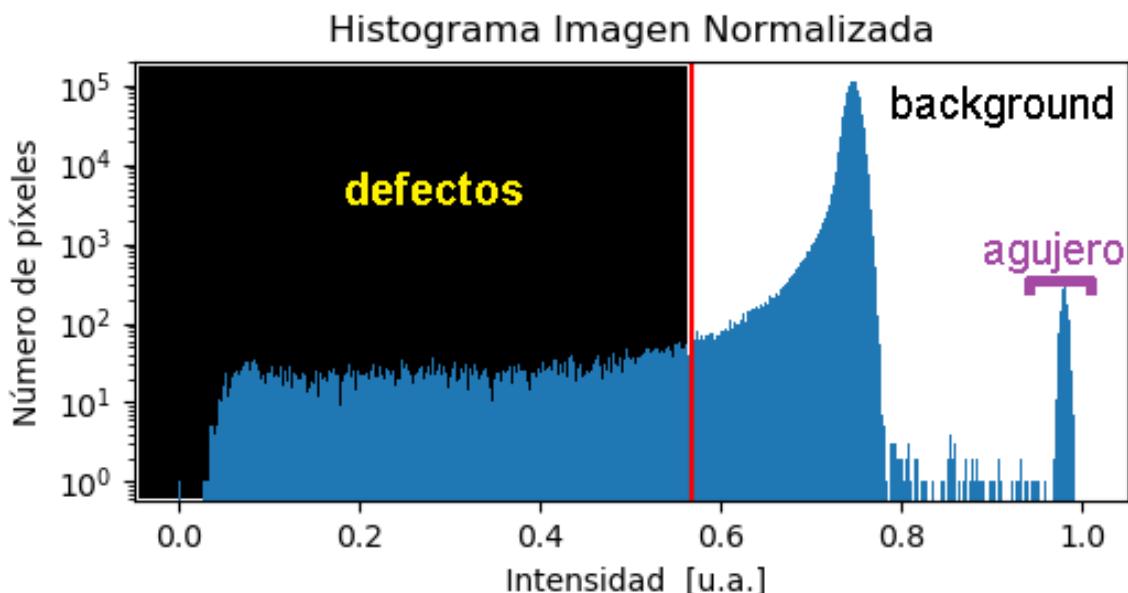


Figura 1.25: Histograma de intensidad de los píxeles de la imagen a) de la Figura 1.24, con el eje vertical en escala logarítmica. La línea roja vertical indica el valor del *threshold* de *Yen* para dicha imagen.

3. **Defects Binary Image.** Se genera una imagen binaria de la imagen normalizada como se muestra en la imagen c) de la Figura 1.24. Para cada píxel de la imagen normalizada se compara su valor de intensidad con el valor del *threshold* y se asigna un 1 (blanco, *background* y huecos) si el valor de intensidad del píxel es mayor que el *threshold* y un 0 (negro, defectos) si ocurre lo contrario. Esto último se puede ver en el histograma de la Figura 1.25.
4. **fill_holes.** Se tapan los huecos como se muestra en la imagen d) de la Figura 1.24 con el método *binary_fill_holes* de la clase *ndimage* de la librería *scipy* del lenguaje *python* [Virtanen et al., 2020].

Se hace notar que en el contexto de imágenes binarias una mancha es un objeto matricial de ciertas dimensiones en píxeles cuyos elementos de matriz son todos iguales a 1 (color blanco). Y, un hueco es un objeto matricial cuyo borde tiene elementos de matriz iguales a 1 (color blanco) pero los elementos de matriz del interior de dicho borde

son iguales a 0 (color negro). Lo que el método *binary_fill_holes* realiza es encontrar objetos que cumplan la condición matricial de un hueco y llenar su interior de píxeles blancos. El tamaño del hueco a tapar puede ser elegido por el usuario a partir de las dimensiones de la matriz de píxeles blancos utilizada. Esta matriz es especificada en el argumento *structure* del método *binary_fill_holes* y es un parámetro fundamental que debe ser especificado de acuerdo a los requerimientos de calidad óptica del usuario ya que su tamaño define el tamaño mínimo del hueco a detectar. En la presente tesis dicho parámetro fue dejado sin especificar, el método tomó el valor por *default* por lo que todos los huecos encontrados fueron tapados.

A continuación se explica la bifurcación en el algoritmo de la detección de defectos en general por un lado sin discriminar su tipo y la detección específica de huecos por el otro lado.

5. *measure_defects*. La detección de los defectos en general fue realizada sobre las imágenes binarias con los huecos tapados (Ver imagen c) de la Figura 1.24). En consecuencia, no se distinguieron los huecos de las manchas, sino que todos los defectos fueron considerados defectos de superficie de acuerdo a las especificaciones técnicas de la ISO 10110 (Ver Sección 1.1.2). Por este motivo resultó importante realizar el tapado de los huecos ya que sino se modificaría el valor del área total de los defectos con estas características, considerando a estos como un solo objeto compuesto por una mancha negra que bordea a un hueco, como por ejemplo de acuerdo al defecto más grande de la Figura 1.24. Este mismo defecto sin tapar tenía un área de $(1065 \pm 6)\mu\text{m}^2$ pero el mismo hueco tapado, es decir el defecto a estimar, tenía un área de $(5174 \pm 160)\mu\text{m}^2$, es decir un área aproximadamente 5 veces mayor. Por este motivo, se detectaron los huecos de forma individual.

En la imagen binaria con los huecos tapados, los defectos ya se encontraban segmentados, es decir que los defectos eran regiones aisladas de píxeles blancos conectados entre sí. El método *measure.label* etiqueta a cada uno de los defectos cuyas propiedades son calculadas con el método *measure.regionprops_table* y luego guardadas en un *DataFrame*

de la librería *pandas*[McKinney, 2010]¹⁴. Las propiedades de los defectos calculadas fueron el área y el diámetro equivalente:

- El área fue calculada a partir del número de píxeles totales que conforman al defecto, siendo un píxel la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital. Así por ejemplo el defecto más grande de la imagen c) de la Figura 1.24 estaba formado por 15068 píxeles. De acuerdo a la calibración del microscopio el área de 1 píxel equivale a $0.586 \mu m \times 0.586 \mu m$, con lo cual $15068 \text{ píxeles} = 15068 \cdot (0.586\mu m)^2 \sim 5174\mu m^2$, con una incertezza asociada de $160 \mu m^2$ (Ver Sección 1.9).
- El diámetro equivalente consiste en el diámetro de un círculo con la misma área calculada en el paso anterior. Igualando dicha área con el área de un círculo, $\pi \cdot (\frac{\text{diámetro}}{2})^2$, se obtiene el diámetro equivalente. Por ejemplo el defecto de la Figura 1.24 tuvo un diámetro de $(81 \pm 6)\mu m$.

6. **Holes Binary Image.** La imagen binaria de los huecos segmentados (Ver Imagen d) de la Figura 1.24) fue generada a partir de tomar la diferencia entre la imagen binaria de los huecos tapados y la imagen binaria de los defectos. Dicha forma de segmentar los huecos como objetos matriciales cuyo borde son unos y el interior son ceros resultó ser la forma más eficiente para no obtener una gran cantidad de falsos positivos (detección de huecos que en realidad no lo son). Con este método el máximo número de huecos encontrado en una banda fue de 12 con lo cual la verificación de los falsos positivos del método se realiza rápidamente observando visualmente las imágenes en las que fueron detectados.

Párrafo aparte merece la explicación de un método alternativo que se ensayó para intentar segmentar los huecos pero que arrojaba una gran cantidad de falsos positivos (Ver Q_{2.7.2}). En el histograma de la Figura 1.25 se observa claramente la región de valores de intensidad cercanos a la saturación (en escala monocromática de la imagen normalizada) que pertenecen al hueco de la imagen a) de la Figura 1.24. Aplicando un *threshold* de intensidad de 0.97 se detecta singularmente el hueco de dicha imagen. Ahora bien, este mismo umbral (ó cualquier variación del mismo) aplicado al conjunto de imágenes de la misma banda arroja miles de falsos positivos de tamaños tan grandes

¹⁴Un *DataFrame* de *pandas* es una estructura de datos que permite una rápida visualización de los datos como en una planilla de excel y que tiene una gran familia de métodos a su disposición para realizar un análisis cuantitativa de los datos.

1. Cuantificación de los defectos

como los propios huecos reales detectados visualmente. Esto ocurre pues el fondo de la imagen normalizada contiene regiones conectadas de píxeles con mayor ó igual valor de intensidad que tiene el centro de un hueco. Además, otro motivo por el que se descartó este método es debido a la definición matricial del hueco data anteriormente que supone que cada hueco presente en las imágenes normalizadas tiene un centro blanco con valores de intensidad cercanos a 1 pero que tiene un borde perimetral oscuro.

Ahora bien, por un lado se detectaron los huecos para poder determinar su diámetro y área de forma más precisa que al ser tratados como defectos en general como se explicó en el proceso 5, *measure_defects*. Además, por otro lado la segmentación de los huecos permitió ubicarlos espacialmente en el filtro de forma tal de poder caracterizarlos espectralmente como se explica en el Capítulo ???. Esto es, para cada hueco detectado se conocen su ubicación en la imagen que fue hallado y como al mismo tiempo se conoce la posición de cada imagen individual en el barrido completo de una banda, se determinan las coordenadas espaciales del hueco en el filtro. Este *feature* del algoritmo permite rápidamente descartar un filtro si no cumple con las especificaciones técnicas requeridas por la aplicación del usuario final y resulta independiente del inspector de turno del filtro como en el caso de la aplicación de la métrica de *scratc & dig* (Ver Sección 1.1.1).

7. *measure_holes* A partir de la imagen segmentada de los huecos se repite el proceso implementado en el paso del algoritmo *measure_defects*: se etiquetan a los huecos y se mide su área y su diámetro equivalente. Dichos resultados son concatenados al *DataFrame* de pandas.
8. *pd.DataFrame*. Los resultados con las incertezas asociadas(Ver Sección 1.9) de los defectos en general y de los huecos contenidos en un *DataFrame* son exportados en un archivo *pickle*¹⁵ que fue manipulado utilizando el entorno interactivo de *IPython Notebook*. Por último, con el método *morphology.remove_small_objects* se puede elegir el tamaño de los defectos a incluir en el análisis definitivo dependiendo de la aplicación del usuario final y de la especificación técnica a ser verificada.

¹⁵Con el módulo *pickle* de python se puede serializar cualquier tipo de objeto de python y guardarse en un archivo *pickle*, de extensión .pkl, que resulta muy eficiente tanto en su escritura como en su lectura.

1.8 Resultados del algoritmo de detección de los defectos de superficie Q_{2.8}

A continuación se muestran los resultados del algoritmo de detección de los defectos de superficie en general y su discusión considerando las especificaciones técnicas de *scratch & dig* y de la ISO 10110 (Secciones 1.1.1 y 1.1.2 respectivamente). Luego se muestran los resultados de la detección de los huecos y posteriormente se discuten los resultados de la población de defectos detectados en general. Finalmente, se hace un análisis de los errores asociados a las dimensiones de los defectos detectados a partir del algoritmo.

1.8.1 Aplicación de la métrica *scratch & dig*

El fabricante del filtro indicó en la hoja de datos que los números de *scratch & dig* para cada banda del filtro son: S/D 20-10. La especificación del *scratch number* lamentablemente no pudo ser verificada en la presente tesis por no contar con muestras calibradas de *scratches* y por no haberse desarrollado un algoritmo que permita distinguir las rayaduras del resto de los defectos en las imágenes de microscopía. Este algoritmo hubiese permitido medir tan sólo el largo de las rayaduras pero no así el nivel de brillo asociado a un cierto *scratch number* que se obtiene bajo ciertas condiciones experimentales especificadas en la normativa. Existen equipos comerciales que pueden reproducir estas condiciones experimentales en las que los inspectores realizan el control de calidad de los *scratches* como por ejemplo el *SavvyInspectorTM SIF-4* de la empresa *Savvy Optics Corp.* y el *ARGOS2* de la empresa *Dioptic*. Ahora bien, como la determinación del *scratch number* suele ser ambigua (Ver 1.3) dicho valor no fue caracterizado en la presente tesis. Además, con el equipo desarrollado que se explica en el Capítulo ?? se podrían analizar los efectos de la presencia de rayaduras en el proceso de formación de imágenes de las cámaras hiperespectrales que utilizan filtros como el analizado en este trabajo, lo que constituiría una caracterización espectral del defecto y lo que permitiría en el futuro establecer una métrica específica de este tipo de aplicaciones.

De acuerdo al *dig number* igual a 10, cada banda del filtro no debería tener más de 1 defecto de *dig number* igual a 10, es decir de diámetro máximo de 100 μm (de acuerdo a 1.2) (i) y la suma de los diámetros de todos los defectos de cada banda no debería ser superior a

0.2 mm (de acuerdo a 1.3) (ii). La primera (i) condición se cumple como se desprende de los diámetros máximos ($d_{máx}$) de los defectos encontrados en cada banda: ninguno supera los $100\mu m$ de diámetro (Ver Tabla 1.1). La segunda (ii) condición se cumple para todas las bandas a excepción de la banda azul pues su valor de la columna $|\sum d|$ de la Tabla 1.1 supera los $0.2mm$. Sería un poco arriesgado decir que el filtro no cumple en consecuencia las especificaciones del *dig number* indicadas por el fabricante ya que el control de calidad no fue realizado en las mismas condiciones experimentales¹⁶.

Banda	# de defectos	$d_{máx}$	$\sum d$
Azul	4	$(81 \pm 6)\mu m$	$(232 \pm 7)\mu m$
Verde	0	-	-
Pancromática	1	$(51 \pm 2)\mu m$	$(51 \pm 2)\mu m$
Roja	0	-	-
NIR	0	-	-

Tabla 1.1: Tabla de los resultados del algoritmo relevantes para la aplicación de la métrica de *scratch & dig*. La columna | # de defectos| contiene el número de defectos de diámetro mayor al mínimo *dig number* de la normativa que es igual a 5 ($50\mu m$ de diámetro máximo), considerando las incertezas. La columna $|d_{máx}|$ indica el valor del diámetro máximo de los defectos detectado. Por último, la columna $|\sum d|$ indica la suma de los diámetros de los defectos con *dig number* mayor a 5 encontrados, considerando las incertezas.

Ahora bien, en la Figura 1.26 se muestra el defecto de diámetro máximo detectado en la banda azul igual a $(81 \pm 6)\mu m$, en color violeta. En la imagen normalizada a) se muestra dicho defecto y en la imagen binaria b) se muestra al defecto segmentado con el umbral original y con el umbral original modificado utilizado para cuantificar las incertezas (Ver Sección 1.9) para este defecto detectado como defecto en general (color violeta) y como hueco (color verde). Como en esta clase de defectos denominados huecos el error cometido por el algoritmo en la determinación del área y diámetro era mucho mayor a las incertezas consideradas, se los segmentó especialmente como se explicó en el proceso 6, **Holes Binary Image** de la Sección 1.7 y como se muestra en la Sección 1.8.3. Este defecto considerado como hueco fue detectado con un diámetro de $(37 \pm 1)\mu m$, es decir con una diferencia del 46%. Y, en consecuencia si se hubiese considerado el diámetro de este defecto igual al diámetro detectado como hueco sí cumpliría la condición (ii) ya que la suma de los diámetros de los defectos en ese caso sería

¹⁶Se hace notar que el control de calidad de la métrica de *scratch & dig* debe ser realizado vía inspección visual utilizando muestras calibradas (Ver Figura 1.2) (Ver □).

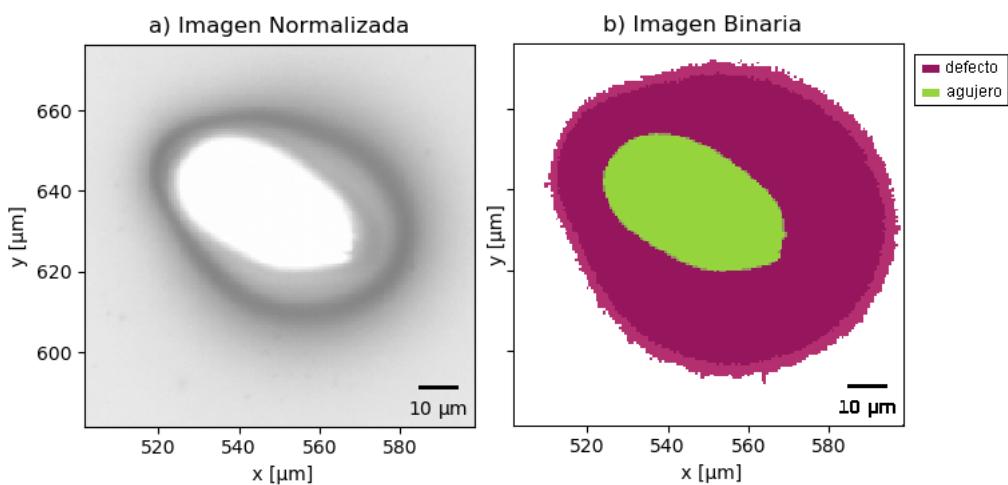


Figura 1.26: a) Región de una imagen normalizada con el defecto más grande de la banda azul ($(81 \pm 6)\mu\text{m}$ de diámetro). b) Imagen binaria del defecto segmentado con el umbral original y con el umbral original modificado utilizado para cuantificar las incertezas (Ver Sección 1.9).

igual a $(188 \pm 8)\mu\text{m}$, con lo cual eventualmente superaría el control de calidad de la métrica.

La falta de precisión de la normativa de *scratch & dig* dada por su método de inspección visual, la ambigüedad técnica de la determinación del *scratch number* y la imposibilidad de poder caracterizar defectos con un *dig number* menor a 5 ($50\mu\text{m}$), han dado lugar a la aparición de otras normativas dentro de las cuales la ISO 10110 es la más utilizada en la industria. Esta normativa indica que el control de calidad de los componentes puede ser tanto visual (con un defecto de tamaño mínimo a determinar por el fabricante) como con cualquier otro método como por ejemplo un sistema automatizado de detección como el explicado en este capítulo. De realizarse esto último como se explicó en la Sección 1.1.2 tiene que haber un acuerdo entre el proveedor y el cliente sobre las condiciones experimentales del control de calidad que tienen que estar especificadas en la hoja de datos del componente.

■ 1.8.2 Aplicación de la normativa ISO 10110-7

Como se explicó en la Sección 1.2, el fabricante no especificó en la hoja de datos del filtro el método de inspección utilizado para garantizar la calidad óptica de acuerdo a la normativa ISO 10110. Se va a suponer que el fabricante realizó el control de calidad vía inspección visual únicamente utilizando muestras calibradas con un mínimo *grade number* igual a 0.016

1. Cuantificación de los defectos

Banda	# de defectos	$d_{máx}$	$\text{Área}_{defectos}$
Azul	115	$(81 \pm 6)\mu m$	$(71488 \pm 583)\mu m^2$
Verde	42	$(35 \pm 2)\mu m$	$(18117 \pm 248)\mu m^2$
Pancromática	65	$(51 \pm 2)\mu m$	$(28786 \pm 61)\mu m^2$
Roja	47	$(44 \pm 2)\mu m$	$(19798 \pm 210)\mu m^2$
NIR	44	$(25 \pm 1)\mu m$	$(11891 \pm 35)\mu m^2$

Tabla 1.2: Tabla de los resultados del algoritmo relevantes para la aplicación de la normativa ISO 10110. La columna | # de defectos| contiene el número de defectos de diámetro mayor al mínimo *grade number* considerado que es igual a 0.016 ($16\mu m$ de diámetro máximo), considerando las incertezas.La columna | $d_{máx}$ | indica el valor del diámetro máximo de los defectos detectado. Por último, la columna |Área_{defectos}| indica el área total cubierta por los defectos de *grade number* mayor a 0.016.

(diámetro de $16\mu m$, ver MOTP-ISO). Esto fue considerado de esta manera para poder aplicar los resultados del algoritmo, como fue el caso de la aplicación de la métrica de *scratch & dig*.

De acuerdo a las especificaciones técnicas de la ISO 10110 (Ver Sección 1.1.2), $5/2 \times 0.063$, en la superficie óptica de cada banda del filtro puede haber un máximo de 2 defectos de *grade number* igual a 0.063 ($63\mu m$ de diámetro) (i), no puede haber defectos con un *grade number* mayor a 0.063 (ii) y, el área total máxima cubierta por defectos de *grade number* mayor ó igual al mínimo valor especificado por el fabricante puede ser de $7938\mu m^2$, de acuerdo a 1.4 (iii). La condición (i) es superada por todas las bandas si se considera al defecto de diámetro máximo de la banda azul como un hueco como se discutió anteriormente y como se puede observar en los valores de la columna | $d_{máx}$ | de la Tabla 1.2 que muestran el diámetro máximo de los defectos detectados de cada banda con *grade number* mayor a 0.016 ($16\mu m$ de diámetro). Esto es así puesto que el defecto de segundo diámetro máximo detectado fue de $(52 \pm 2)\mu m$. La condición (ii) sería igualmente superada pero la condición (iii) no es superada en ninguna de las bandas como se desprende de los valores de la columna |Área_{defectos}| que muestra el área cubierta por los defectos relevantes.

El método de control de calidad del filtro presentado en este capítulo podría ser compatible con el control de calidad del fabricante bajo la normativa ISO 10110. Para ello, debería establecerse un acuerdo en las condiciones experimentales bajo las que se indican las especificaciones de calidad de la superficie óptica entre las partes. Más aún, parte del presente trabajo consistió en el desarrollo de una nueva métrica para establecer qué defectos son permitidos,

su tamaño máximo,etc., en función de las consecuencias que tienen los defectos en el proceso de formación de imágenes.

Por último, se hace notar que el proceso completo de detección de los defectos y de aplicación de la normativa ISO 10110 ó de la métrica de *scratch & dig* en las condiciones del método de inspección aquí propuesto, toma un tiempo total de aproximadamente 1 hora. Este tiempo estimado es resultado de considerar los 10 minutos aproximados que toma la adquisición de cada banda (50 minutos en total) y de ejecutar el procesamiento de las imágenes y el algoritmo de detección de los defectos que fue de 2 minutos por banda (10 minutos en total). En este aspecto, se hace notar que el método propuesto es lo suficientemente rápido como para no ralentizar el resto de los procesos involucrados en la construcción y puesta a punto de una cámara hiperespectral.

■ 1.8.3 Resultados del algoritmo de detección de los huecos

En la Tabla 1.3 se muestran los resultados principales del algoritmo de detección de los huecos del filtro. Como se explicó anteriormente la detección de los huecos permitió ubicarlos espacialmente en el filtro y en consecuencia se podría caracterizar su espectro de transmisión de forma individual (Ver Capítulo ??).

Banda	# de huecos	d _{máx} huecos
Azul	12	(37 ± 1) μm
Verde	3	(11 ± 1) μm
Pancromática	0	-
Rojo	3	(9 ± 1) μm
NIR	1	(6 ± 1) μm

Tabla 1.3: Tabla de los resultados del algoritmo de detección de los huecos.

En la Figura 1.27 se muestran las imágenes normalizadas originales que contienen a los huecos más grandes de la banda NIR (i)) y de la banda verde (iii)). En las imágenes ii) y iv) se muestran los resultados del algoritmo de detección de los huecos respectivamente y se observa que el algoritmo es capaz de diferenciar a los huecos en color verde del resto de los defectos tipo manchas en color violeta. En la siguiente sección se muestra la población

1. Cuantificación de los defectos

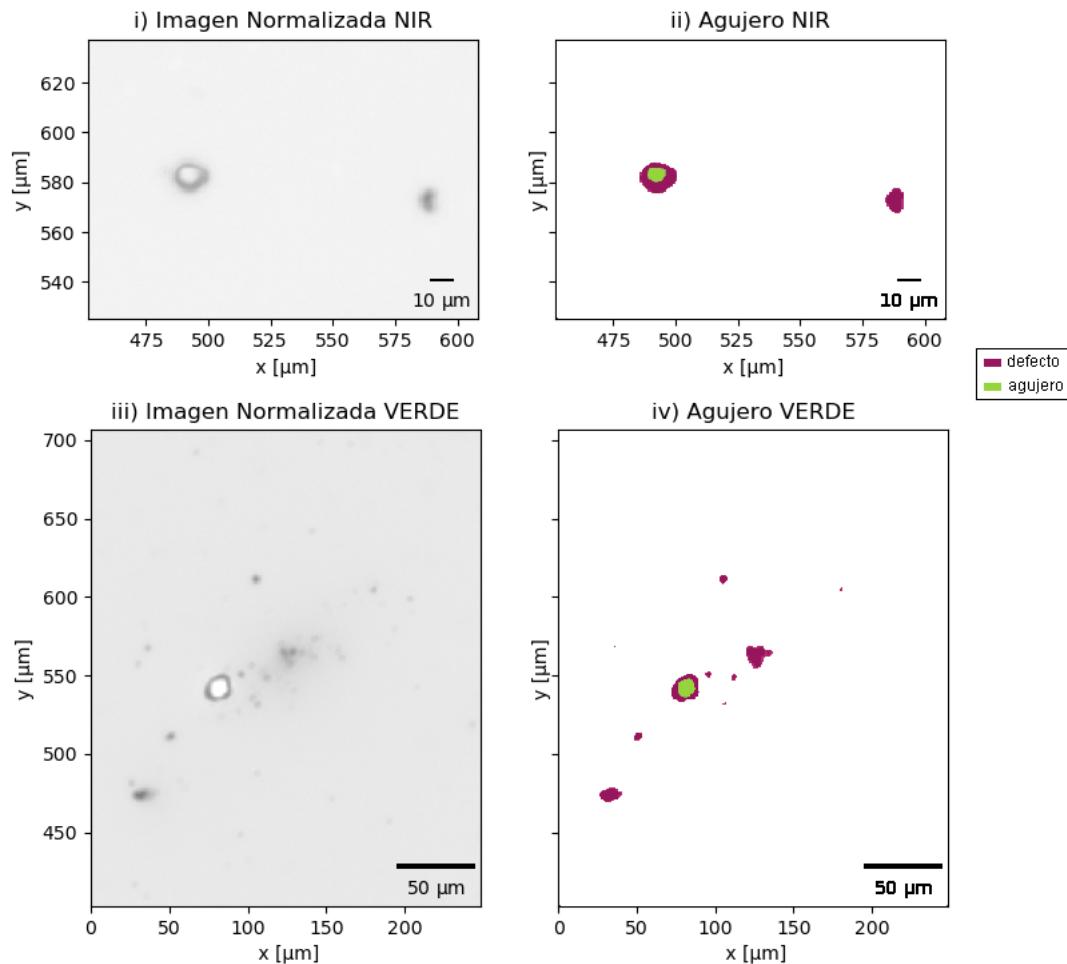


Figura 1.27: i) Imagen normalizada de la banda NIR con el hueco de diámetro máximo detectado igual a $(6 \pm 1) \mu\text{m}$. ii) Imagen binaria de la banda NIR generada a partir del algoritmo de la imagen i). iii) Imagen normalizada de la banda verde con el hueco de diámetro máximo detectado igual a $(11 \pm 1) \mu\text{m}$. iv) Imagen binaria de la banda verde generada a partir del algoritmo de la imagen iii)

de defectos en general detectada en el filtro y luego para finalizar el capítulo se detalla la asociación de incertezas a los resultados reportados.

■ 1.8.4 Población de defectos detectados en general 2.8.4

Los resultados de esta subsección así como la determinación del diámetro de los huecos [1.8.3] fueron fundamentales como criterios de elección de los componentes del equipo desarrollado que se explica en el Capítulo ?? y para el desarrollo de cualquier otro equipo alternativo.

En la Tabla 1.4 se muestran los resultados representativos y cuantitativos de la población de defectos en general detectados de diámetro mayor a los $3\mu m$ incluyendo a los huecos.

Banda	# defectos	d _{máx} defectos	% Área _{defectos}	# huecos	d _{máx} huecos
Azul	5443	(81 ± 6) μm	0.14 %	12	(37 ± 1) μm
Verde	2209	(35 ± 2) μm	0.07 %	3	(11 ± 1) μm
Panc.	2065	(51 ± 2) μm	0.09 %	0	-
Rojo	1405	(44 ± 2) μm	0.06 %	3	(9 ± 1) μm
NIR	1552	(25 ± 1) μm	0.04 %	1	(6 ± 1) μm
Total	12674	(81 ± 6) μm	0.08 %	19	(37 ± 1) μm

Tabla 1.4: Tabla de los resultados representativos del algoritmo de detección de los defectos. La columna |# de defectos| muestra el número de defectos de diámetro mayor a $3\mu m$. Este diámetro mínimo fue elegido considerando la resolución del microscopio y el Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon (Ver Sección 1.9). La columna |d_{máx} defectos| indica el diámetro máximo de los defectos detectados. La columna |% Área_{defectos}| indica el porcentaje aproximado del área total de cada banda cubierta por defectos. El área total de cada banda considerada fue igual al área adquirida en el *tile scan*. La fila |Total| resume los resultados de las cinco bandas: número total de defecto, diámetro máximo de los defectos detectados, porcentaje de área total (de la suma de las áreas de las 5 bandas) cubierta por los defectos, número de huecos y diámetro máximo de los huecos detectados.

Se hace notar que resulta inevitable que entre los defectos detectados haya partículas de polvo y otras suciedades en general dado que esta inspección no fue realizada en una sala limpia. Ahora bien, si el método propuesto en este capítulo se desarrollara industrialmente, la Tabla 1.4 podría ser incluida en una hoja de datos del filtro y a partir de su análisis se podría determinar bajo algún criterio a desarrollar en conjunto con el proveedor, si el filtro supera las especificaciones de calidad propias de la aplicación en cámaras hiper y multiespectrales utilizadas en satélites.

En la Figura 1.28 se muestra el *boxplot* (también llamado *box-and-whisker plot*) de la distribución de los valores del diámetro de los defectos. La mediana de dicha distribución, es decir el valor del percentil 50, fue igual a $4\mu m$, lo que indica que el 50% de los defectos tuvieron un diámetro menor a $4\mu m$. El percentil 75 fue igual a $5\mu m$, es decir que el 75% de los defectos detectados fueron de un diámetro menor a $5\mu m$.

A partir de los resultados de la distribución del diámetro de los defectos, se decidió diseñar el microespectrómetro que se explica en el Capítulo ?? con una resolución óptica lateral capaz

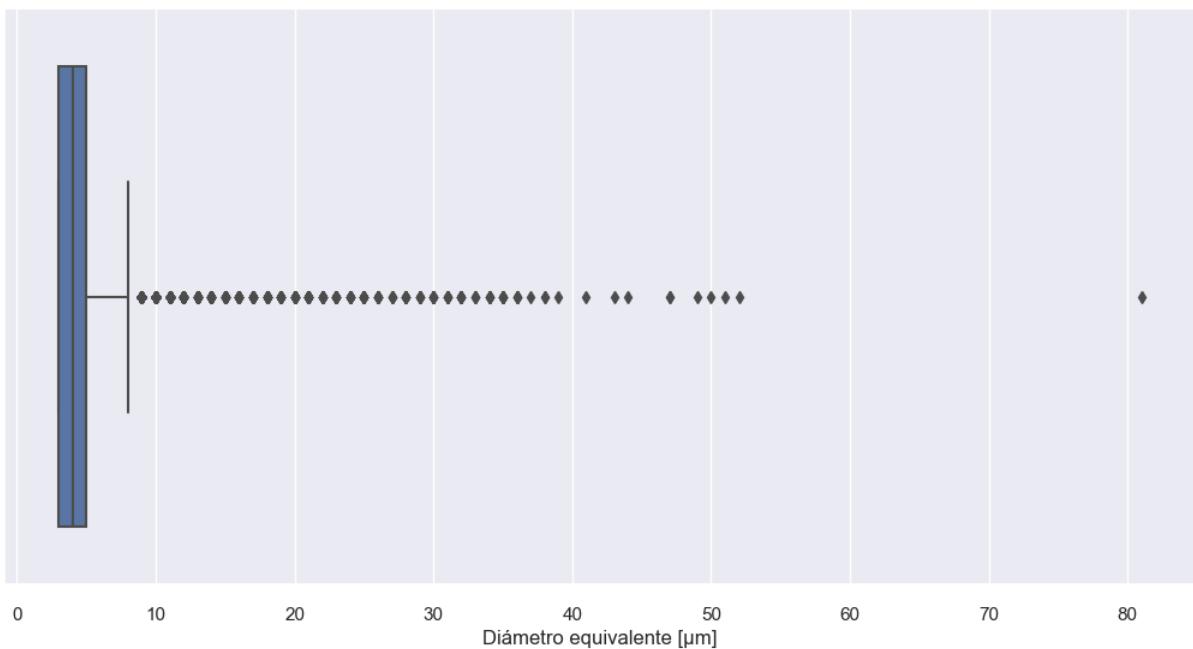


Figura 1.28: Boxplot del diámetro de los defectos de diámetro mayor ó igual a $3 \mu m$.

de detectar defectos de diámetro mínimo igual a $20\mu m$, es decir que se decidió caracterizar a la gran mayoría de los defectos que aparecen como *outliers* en el boxplot de la Figura 1.28. Los *outliers* son todos los defectos de diámetro mayor al valor del cuarto percentil de la muestra de los datos y que en el gráfico está indicado por la barra vertical a la derecha del *box*.

■ 1.9 Asociación de incertezas a los resultados del algoritmo

El diámetro mínimo de un defecto detectable debe ser, de acuerdo al Teorema de Nyquist-Shannon, mayor ó igual que el doble del poder de resolución(R) del microscopio que viene dado por el Criterio de Rayleigh (fuente de luz incoherente) y que es igual a:

$$R = \frac{0.61 \lambda}{N.A.}, \quad (1.10)$$

donde λ es la longitud de onda central de la fuente de luz utilizada, que en este caso fue una fuente de luz blanca por lo que considerando $\lambda = 0.55\mu m$. y, N.A. es la apertura numérica del objetivo que fue de 0.25. En consecuencia, la resolución óptica del microscopio estimada

teóricamente fue de $1.34\mu m^{17}$. De esta manera el diámetro del mínimo defecto detectable fue igual a $2 \times 1.34\mu m = 2.68\mu m \sim 3\mu m$, donde se approximó el resultado puesto que se trata de un límite teórico y para establecer la precisión de todos los resultados adquiridos con el algoritmo. De acuerdo a la calibración del microscopio cada píxel equivale a $0.586\mu m$, con lo cual el diámetro del defecto más chico detectable medido en cantidad de píxeles fue de 5 píxeles ($5 \times 0.586\mu m = 2.94\mu m \sim 3\mu m$). Este criterio se implementó en el algoritmo por medio del método *morphology.remove_small_objects* eligiendo el tamaño del mínimo defecto a detectar en el argumento *min_size* de la función.

El error principal del algoritmo en la detección de los defectos y en consecuencia en la determinación del diámetro equivalente y área de los mismos consistió en la precisión con la que se determinó el borde de cada defecto. Esto último depende fuertemente del grado de contraste de la transición de los valores de intensidad en la imagen desde el borde del defecto hasta el fondo de la imagen que lo rodea [Turchette and Turner, 2012]. Para cuantificar este error se realizó una variación del umbral de intensidad que distinguía a los defectos del fondo de la imagen. La variación del valor del *threshold* fue de hasta el 8% del valor del *threshold* original dependiendo de cada banda. A partir del valor de umbral modificado, el proceso de segmentación y determinación de las propiedades de los defectos resultó el mismo que con el valor de umbral original. El criterio de elección del porcentaje de variación del umbral consistió en que se tenía que obtener la misma cantidad de defectos que con el umbral original de forma tal de poder calcular el error de forma automatizada. Esto al mismo tiempo aseguraba que dicha variación no fuera tan grande como para que el algoritmo no pudiera segmentar dos defectos muy cercanos ó por otro lado dejar de detectar ciertos defectos. En la Figura 1.29 se muestra una región con un defecto de la banda verde (Imagen a)) y las imágenes binarias del *threshold* original y de su variación superpuestas (Imagen b)). En la Imagen c) de la misma figura se muestra un *zoom* sobre uno de los bordes del defecto donde los píxeles de color rosa están asociados a la imagen binaria generada con el *threshold* original y los píxeles de color violeta están asociados a la variación de dicho umbral.

¹⁷Si se considera que la fuente de luz tuvo un espectro de emisión en el rango con longitudes de onda entre 400 y 700 nm, la resolución teórica estimada se encuentra en el rango comprendido entre los 0.98 y 1.71 μm .

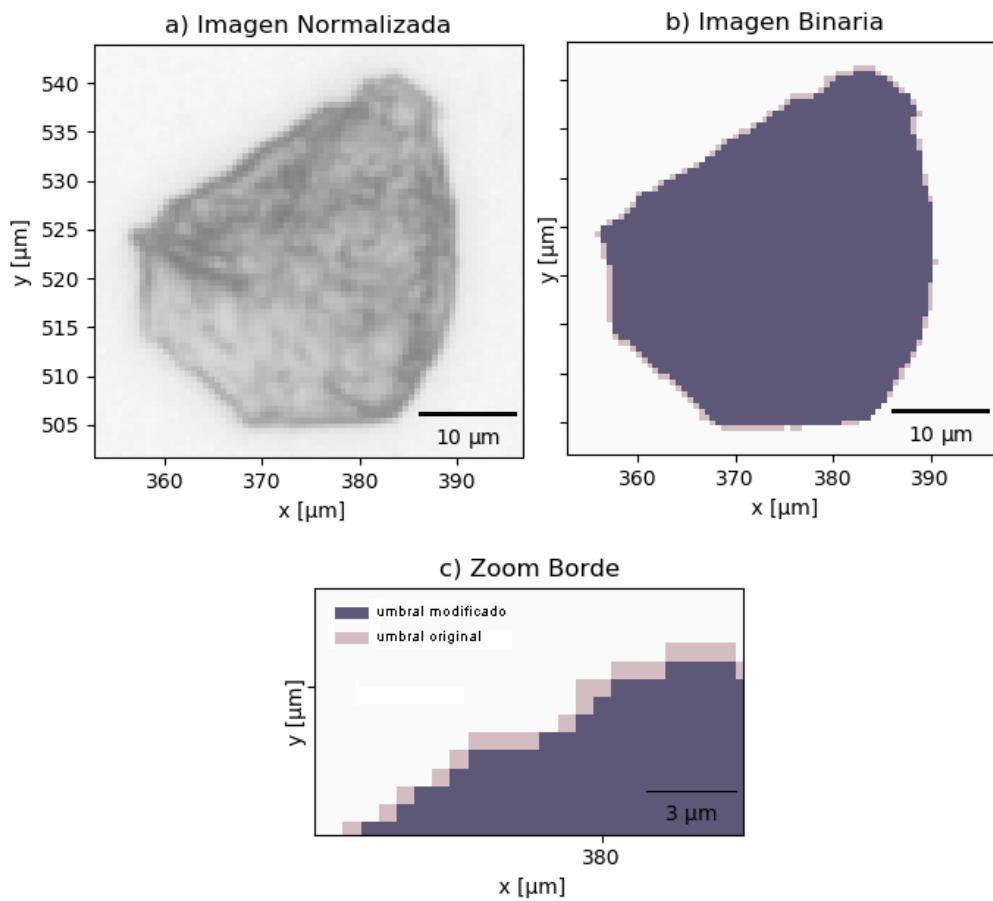


Figura 1.29: a) Región de una imagen normalizada con un defecto de la banda verde.b) Imágenes binarias superpuestas del umbral original y de su variación para cuantificar el error cometido. c) Zoom sobre uno de los bordes del defecto.

En el ejemplo de la Figura 1.29 se obtuvo un defecto con un área que para el umbral original estuvo compuesta por 2793 píxeles ($959\mu\text{m}^2$) y para su variación el área fue de 2640 píxeles ($906\mu\text{m}^2$). El diámetro equivalente fue de $35\mu\text{m}$ y $34\mu\text{m}$ respectivamente. En todos los resultados de diámetros y áreas de defectos detectados con el algoritmo explicado en la sección 1.7, se reportó el resultado obtenido con el umbral original y se asoció como incertezza la diferencia entre el valor obtenido con el umbral y su variación. Así por ejemplo, el defecto de la Figura 1.29 tuvo un diámetro de $(35 \pm 1)\mu\text{m}$.

Referencias Bibliográficas

- [Aikens, 2010] Aikens, D. M. (2010). The truth about scratch and dig. In *International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing*, page OTuA2. Optical Society of America.
- [Etzold et al., 2016] Etzold, F., Kiehaber, D., Warken, A., Würtz, P., Hon, J., and Asfour, J.-M. (2016). A novel approach towards standardizing surface quality inspection. page 1000908.
- [Glasbey, 1993] Glasbey, C. (1993). An analysis of histogram-based thresholding algorithms. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 55(6):532 – 537.
- [Gomez et al., 1998] Gomez, S., Hale, K., Burrows, J., and Griffiths, B. (1998). Measurements of surface defects on optical components. *Measurement Science and Technology*, 9(4):607–616.
- [ISO, 2018] ISO (2018). *ISO 10110 - Preparation of drawings for optical elements and systems*.
- [Jain, 1989] Jain, A. K. (1989). *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc., USA.
- [Li and Lee, 1993] Li, C. and Lee, C. (1993). Minimum cross entropy thresholding. *Pattern Recognition*, 26(4):617 – 625.
- [Lowe, 1999] Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, volume 2, pages 1150–1157 vol.2.
- [McKinney, 2010] McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in python. In van der Walt, S. and Millman, J., editors, *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pages 51 – 56.
- [Military, 1960] Military, U. (1960). *Surface quality standards for optical elements scratch and dig. Drawing C7641866*.

1. Cuantificación de los defectos

- [Military, 1997] Military, U. (1997). *MIL-PRF-13830B. PERFORMANCE SPECIFICATION: OPTICAL COMPONENTS FOR FIRE CONTROL INSTRUMENTS; GENERAL SPECIFICATION GOVERNING THE MANUFACTURE, ASSEMBLY, AND INSPECTION OF*. U.S. Department of Defense.
- [Mortimer Abramowitz, 2020] Mortimer Abramowitz, M. W. D. (2020). Microscope illumination. <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/anatomy/illumination/>.
- [Nordenfelt et al., 2018] Nordenfelt, P., Cooper, J. M., and Hochstetter, A. (2018). Matrix-masking to balance nonuniform illumination in microscopy. *Opt. Express*, 26(13):17279–17288.
- [Otsu, 1979] Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1):62–66.
- [Pose, 2017] Pose, A. (2017). Adquisición, procesamiento y análisis de imágenes hiperespectrales: de la microscopía de fluorescencia a la industria satelital. Master's thesis, UBA, Argentina. Director: Dr. Hernán Grecco.
- [Prewitt and Mendelsohn, 1966] Prewitt, J. M. S. and Mendelsohn, M. L. (1966). The analysis of cell images*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 128(3):1035–1053.
- [Ridler, 1978] Ridler, TW & Calvard, S. (1978). Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 8(8):630–632.
- [Schöch et al., 2018] Schöch, A., Perez, P., Linz-Dittrich, S., Bach, C., and Ziolek, C. (2018). Automating the surface inspection on small customer-specific optical elements. In Schelkens, P., Ebrahimi, T., and Cristóbal, G., editors, *Optics, Photonics, and Digital Technologies for Imaging Applications V*, volume 10679, pages 281 – 291. International Society for Optics and Photonics, SPIE.
- [Schindelin et al., 2012] Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., and Cardona, A. (2012). Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9:676–82.
- [Shapiro, 2002] Shapiro, Linda G. & Stockman, G. C. (2002). *Computer Vision*. Prentice-Hall, Inc., USA.
- [Thorlabs, 2020] Thorlabs (2020). Mil surface imperfection standards. https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=1427&pn=MOTP-MIL.
- [Turchette and Turner, 2012] Turchette, Q. and Turner, T. (2012). Automated inspection of optics using iso specifications. pages 15–16. OPN.
- [Van der Walt et al., 2014] Van der Walt, S., Schönberger, J. L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J. D., Yager, N., Gouillart, E., and Yu, T. (2014). scikit-image: image processing in python. *PeerJ*, 2:e453.

[Virtanen et al., 2020] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Jarrod Millman, K., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald, A. M., Ribeiro, A. H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., and Contributors, S. . . (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17:261–272.

[Wikipedia, 2020] Wikipedia (2020). Microscopio de campo oscuro.
https://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_de_campo_oscuro.

[Young, 1989] Young, M. (1989). The Scratch Standard Is Only A Cosmetic Standard. In Greivenkamp, J. E. and Young, M., editors, *Surface Characterization and Testing II*, volume 1164, pages 185 – 190. International Society for Optics and Photonics, SPIE.

[Zack et al., 1977] Zack, G. W., Rogers, W. E., and Latt, S. A. (1977). Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, 25(7):741–753. PMID: 70454.

[Zeiss, 2014] Zeiss, C. (2014). *ZEISS Axiocam 702 mono. User Guide*.

[Zeiss, 2016] Zeiss, C. (2016). *Quick Guide. ZEN 2012 SP2. Importing and exporting images*.