



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

Cámaras de cielo: ¿más allá de las nubes?

Autor:

Iván Reyes Rodríguez

Tutor/es:

Roberto Román Díez

Juan Carlos Antuña Sánchez

Resumen

Las medidas de radiancia en la atmósfera a distintas longitudes de onda permiten el estudio de su composición y de las características de los aerosoles que se encuentran en ella. El método principal de obtención de estos datos es la medida de radiancia solar de almucantar y plano principal mediante fotómetros solares. En este trabajo se explora la posibilidad de obtener esos datos usando una cámara de cielo, generando un mapa de radiancia relativa del cielo a partir de las imágenes tomadas por una cámara. A continuación se han comparado los resultados con las medidas de un fotómetro para los ángulos comunes a ambos. Los dos aparatos de medida se encuentran instalados en la Facultad de Ciencias de Valladolid.

En el trabajo se ha utilizado la cámara SONA202NF (Sieltec Canarias SL) para realizar medidas de varias exposiciones y tiene filtros para 3 longitudes de onda efectivas (605 nm, 536 nm y 467 nm). Se ha comprobado la linealidad del sensor CMOS y calculado los tiempos de exposición para obtener imágenes de alto rango dinámico (HDR) lineales.

Posteriormente se han comparado los mapas de radiancia lineal con las medidas de almucantar normalizadas del fotómetro CE318-T (Cimel Electronique SAS) para las longitudes de onda disponibles más cercanas, 675 nm, 500 nm y 440 nm.

Abstract

Atmospheric radiance measurements at different wavelengths allow the study of the properties and composition of aerosols present in the atmosphere. The main method of acquiring data for this purpose is taking solar radiance measurements along the almucantar and principal planes with a solar photometer. The present work studies the possibility of using all-sky cameras to obtain this data, generating a relative radiance map from images taken by a camera and comparing it with photometer measurements for common angles. Both devices are installed in the Faculty of Sciences of the University of Valladolid.

The camera used for this work is the SONA202NF (Sieltec Canarias SL). Several exposure measurements were taken at three different wavelengths (605 nm, 536 nm and 467 nm). The linearity of the CMOS sensor was checked and the exposure time was determined in order to obtain linear high dynamic range (HDR) images.

Lastly, the obtained linear radiance maps were compared with the normalised almucantar measurements of the Cimel photometer for the nearest available wavelengths, 675 nm, 500 nm and 440 nm.

AGRADECIMIENTOS

A los investigadores de Valladolid Victoria E. Cachorro Revilla y Carlos Tolledo así como al Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid por el establecimiento y mantenimiento de los instrumentos utilizados en este trabajo.

A la empresa Sieltec Canarias SL por la cámara SONA202NF utilizada para tomar imágenes en Valladolid.

A mis tutores Roberto y Juan Carlos, por su paciencia, disponibilidad y por su constante ayuda y consejo en la realización de este trabajo

A mi familia, por su apoyo y estar ahí siempre que lo necesitado.

Y por último, a mis amigos, con los que he compartido estos años tan importantes en mi vida.

Índice general

	Página
Resumen	III
Abstract	V
Agradecimientos	VI
Capítulos:	
1.. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
2.. Instrumentación	3
2.1. Cámara de cielo	3
2.2. Red AERONET	5
2.3. Fotómetro	5
3.. Metodología	7
3.1. Obtención de los datos	7
3.1.1. Extracción del ruido	7
3.2. Determinación de los tiempos de exposición	9
3.2.1. Estudio de la linealidad del sensor	9
3.2.2. Cálculo de los tiempos de exposición relativos	10
3.3. Construcción del mapa de radiancia	11
3.4. Calibración geométrica	12
3.5. Muestreo de datos y comparación con fotómetro	12
4.. Resultados	14

5.. Conclusiones	21
----------------------------	----

Apéndices:

A.. Comparación de resultados y errores para todas las medidas del 6 de julio de 2019	22
---	----

B.. Representación de cocientes para el estudio de la linealidad.	29
---	----

Bibliografía	37
------------------------	----

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Los aerosoles atmosféricos son partículas sólidas o líquidas en suspensión en el aire. Pueden ser de origen antropogénico, como las partículas de humo debido a la actividad industrial, o natural, resultado de la actividad volcánica, incendios o tormentas de polvo, entre otros. Su presencia afecta al clima y a la calidad del aire. También actúan como núcleos de condensación afectando a la formación de las nubes (Figura 1.1). En consecuencia, el estudio de los aerosoles es vital para comprender el balance radiativo de la Tierra, es decir, el mecanismo de el calentamiento y enfriamiento terrestre.

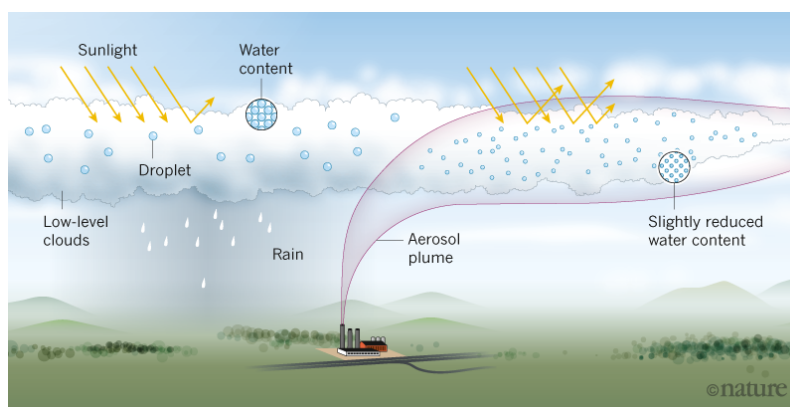


Figura 1.1: Ejemplo del impacto de los aerosoles de origen humano en las nubes bajas de la atmósfera. Las nubes formadas en presencia de los aerosoles de una fábrica tienen gotas más pequeñas y numerosas. *Fuente: Nature*

El conocimiento de los aerosoles se puede conseguir mediante diferentes técnicas. Estudiando el scattering de la luz solar con los aerosoles se pueden inferir propiedades como la distribución de tamaños o su composición química a

partir de medidas de la radiancia del cielo. Este análisis se realiza con algoritmos de inversión [1] a partir de medidas de fotómetros solares. Para ello se utilizan medidas de espesor óptico de aerosoles (radiación directa del sol) y de radiancia del cielo. Para este segundo tipo de medidas, una alternativa más económica que los fotómetros solares son las cámaras de cielo.

Las cámaras de cielo son instrumentos que capturan un mapa de radiancia en todas las direcciones y en varias bandas espectrales a la vez. Mediante *exposure bracketing*, con capturas sucesivas con distinto tiempo de exposición, permiten obtener imágenes de alto rango dinámico (*HDR*) casi instantáneamente. Unido a que su coste es inferior a otros instrumentos, resultan una herramienta interesante con la que trabajar.

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es la obtención de un mapa de radiancia lineal relativa a partir de los datos proporcionados por una cámara de cielo SONA 202NF. Para ello, primero se estudiará el comportamiento del sensor CMOS de la cámara y el ruido con señales bajas. Se determinarán en base a este estudio los tiempos de exposición de las imágenes, que están cuantificados por el sensor y no se conocen con precisión. A continuación, se construirán los mapas de radiancia lineal y se calibrarán geoméricamente. Por último se comprobarán los resultados comparando los perfiles de almucantar del mapa de radiancia obtenido con la cámara con el de un instrumento de referencia, un fotómetro CE318-T.

Capítulo 2

Instrumentación

Los instrumentos de medida se encuentran en la estación del Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid (GOA-UVa) ubicada en la Facultad de Ciencias de la UVa (41.664°N 4.706°W). Para las capturas del cielo se ha trabajado directamente con los archivos generados por la cámara de cielo. Los datos de radiancia en almucantar del fotómetro Cimel han sido obtenidos de la red AERONET (AErosol RObotic NETwork) [2].

2.1. Cámara de cielo

Las cámaras de cielo son dispositivos terrestres que toman imágenes completas del cielo. Generalmente tienen un sensor CCD o CMOS y trabajan en el espectro visible, con canales en el rojo, verde y azul. Para lograr el alto campo de visión se utiliza una lente gran angular o un espejo curvado.

Las cámaras de cielo son comúnmente usadas para observar la cubierta nubosa y para extraer información auxiliar sobre el estado del cielo. Pueden monitorizar el estado de la atmósfera y las nubes cuando se toman medidas con otros instrumentos como ceilómetros [3]. También permiten caracterizar aerosoles por la noche usando la luna [4]. Pueden cuantificar la cubierta nubosa y su espesor y altura mediante estereoscopía [5]. Otros usos incluyen el estudio de la polarización del cielo, de la turbiedad atmosférica e incluso la observación de bólidos y cuerpos celestes.

Su mayor ventaja es la velocidad de adquisición de datos, ya que permiten la captura de un mapa del cielo de manera casi instantánea y en varias longitudes de onda, sin necesidad de piezas motorizadas. Se puede configurar su tiempo de exposición y ganancia y son por lo general asequibles.

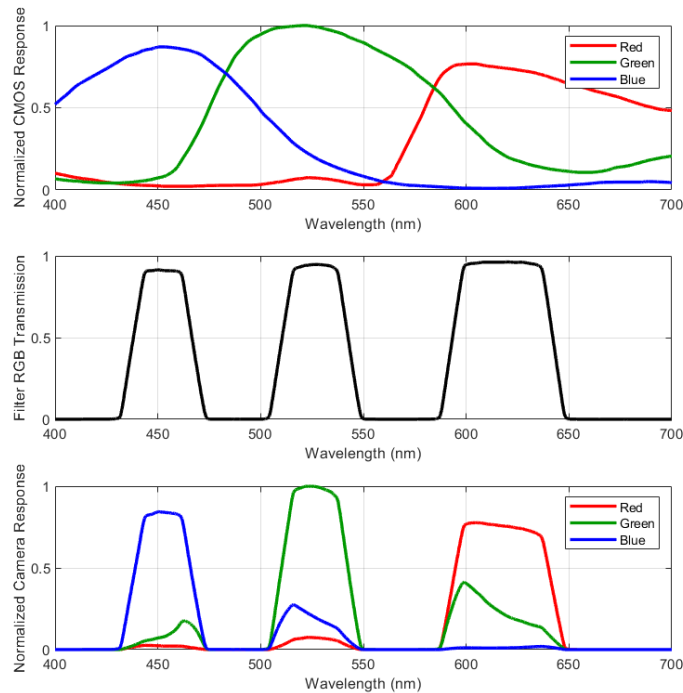


Figura 2.1: Respuesta normalizada del sensor CMOS, factor de transmisión del filtro y respuesta normalizada de la cámara.

Las dificultades técnicas que se tienen que abordar en este trabajo son la respuesta no lineal del sensor, su saturación y la corriente oscura. Los sensores tipo CCD (*charge-coupled device*) pueden presentar artefactos de blooming al saturarse que generan un sangrado de señal a lo largo de toda la imagen, por lo que es común tapar con una banda o dispositivo móvil la trayectoria del sol. También se tendrá en cuenta la necesidad de calibración espacial.

La cámara utilizada en este trabajo es la SONA 202NF (Sieltec Canarias SL). En la figura 2.2 se muestra la cámara instalada en la facultad. Es una cámara con lente ojo de pez, estática y sin sombra. El sensor es de tipo CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*), lo que reduce los efectos de blooming cuando se satura en zonas cercanas al sol, imprescindible en cámaras que no tienen bandas de sombra. La respuesta espectral de la cámara se muestra en 2.1. Las longitudes de onda efectivas son 605 nm para el canal rojo, 536 nm para el verde y 467 nm para el azul [6].



Figura 2.2: Imagen de la cámara SONA 202NF de Sieltec Canarias SL.
Fuente: Rogelio Carracedo

2.2. Red AERONET

Formada por colaboradores de todo el mundo, la red AERONET proporciona una base de datos de acceso público para investigación en aerosoles. También impone la estandarización de instrumentos, calibración, procesamiento y distribución de los datos permitiendo la comparación entre distintas estaciones. La herramienta web para la descarga de datos ofrece 3 niveles de calidad: Nivel 1, datos crudos sin calibración; nivel 1.5, datos en cuasi tiempo real con una pre-calibración aplicada y donde se han extraído las nubes estomáticamente; y nivel 2, de calidad asegurada con una pre y post- calibración.

2.3. Fotómetro

El fotómetro CE318-T es un instrumento con un sistema motorizado que permite la medida de irradiancia solar y lunar y de la radiancia del cielo. Esta formado por un colimador, una rueda de filtros y dos detectores. La rueda esta configurada con filtros de interferencia de paso banda para múltiples longitudes de onda. Un detector de silicio mide las longitudes de onda de 1020 nm y mas cortas, y uno de InGaAs para las de 1020 nm y 1640 nm.



Figura 2.3: Estación de los fotómetros Cimel-318 en Valladolid.
Fuente: AERONET

En general, los fotómetros CE318 que componen la red AERONET toman medidas de irradiancia solar directa y radiancia del cielo. El CE318-T es capaz de tomar también medidas de irradiancia lunar. Las medidas de radiancia del cielo se toman para longitudes de onda nominales de 380, 440, 500, 675, 870, 1020 y 1640 nm. El escaneo se realiza con dos configuraciones distintas: almucantar y escenarios híbridos.

El perfil de almucantar se obtiene manteniendo el ángulo de zenit igual al solar y variando el ángulo de azimut. El híbrido es una mezcla entre almucantar y plano principal, en el que se barre el plano perpendicular al azimut solar. Ambos modos presentan simetría espacial respecto al sol, lo que permite descartar las medidas contaminadas por la presencia de nubes.

Para este trabajo se han descargado de AERONET versión 3, los datos a nivel 2 de escenario de almucantar a las longitudes de onda de 440 nm, 500 nm y 675 nm.

Capítulo 3

Metodología

En este apartado se detalla el proceso de obtención de imágenes, el cálculo de los tiempos de exposición así como el tratamiento para generar los mapas de radiancia y la calibración geométrica.

Para la realización del trabajo se ha utilizado el lenguaje de programación Python, en el que se han escrito los scripts para el procesado de todos los datos, así como para obtención de imágenes y la realización de las gráficas.

3.1. Obtención de los datos

Se ha trabajado con la cámara de Valladolid usando imágenes diurnas tomadas a lo largo del 6 de julio de 2019. Cada 5 minutos, la cámara toma 7 capturas con distinto tiempo de exposición. Son almacenadas en un archivo *.h5* junto con varios atributos como el tiempo de exposición, ganancia, fecha, hora, y temperatura. Los tiempos de exposición nominales son 0.3, 0.4, 0.6, 1.2, 2.4, 4.8, 9.6 microsegundos, y se han tomado sin amplificar la señal. Sin embargo, el sensor parece tener los tiempos de exposición cuantificados, por lo que su valor real no tiene porque coincidir con el introducido como parámetro de entrada. Para solucionarlo, se calcularán a partir del valor de cada píxel en distintas exposiciones. Cada una de las exposiciones tiene 1158×1172 puntos. De acuerdo al patrón del filtro de color Bayer (Figura 3.1) y del sensor, la mitad de los puntos pertenecen al canal verde y $\frac{1}{4}$ al rojo y $\frac{1}{4}$ al azul. El valor de cada punto se almacena en una variable de tipo "uint16", de valor entero sin signo entre 0 y 65535.

3.1.1. Extracción del ruido

La corriente oscura es una de las mayores fuentes de ruido tanto en sensores CCD como CMOS, especialmente cuando la señal de entrada es pequeña. Esta

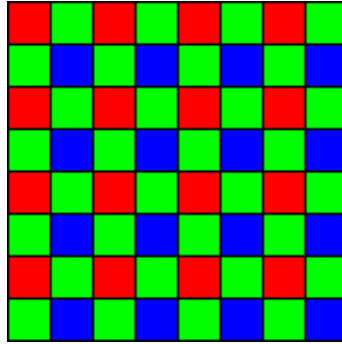


Figura 3.1: Patrón del sensor de la cámara y del filtro.

corriente se produce aunque no incidan fotones y esta relacionada con la generación térmica de electrones y huecos en el sensor. Su magnitud y distribución espacial depende de efectos cristalinos en el sensor y aumenta con la temperatura.

Inicialmente se planteó utilizar la señal en los bordes de la imagen para determinar la corriente oscura media y restarla. Sin embargo, la señal existente en estas zonas se debía también a reflexiones internas en la cámara. Finalmente, se optó por tomar varias imágenes de señal oscura, tapando la cámara. Fijándonos en la figura 3.2, el valor medio de los píxeles no depende del tiempo de exposición, así que se ha tomado un valor medio de corriente oscura de 1929 que se ha restado a todas las imágenes.

Existen más procedimientos para tratar con este tipo de ruido. Aunque es más común para CCD, se puede realizar una sustracción de marco oscuro en un sensor CMOS [7], pero para las imágenes diurnas utilizadas en este trabajo no ha sido necesario.

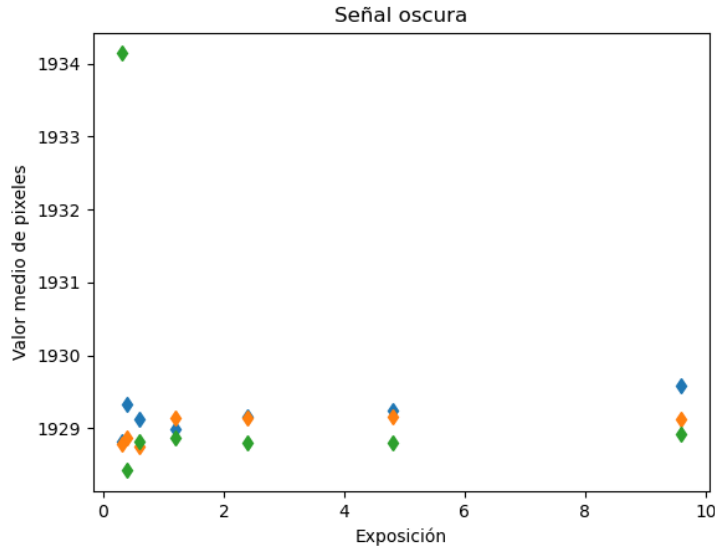


Figura 3.2: Representación del valor promedio de 3 imágenes oscuras, tomadas con la cámara tapada. Se observa que es constante respecto al tiempo de exposición. También se ha comprobado previamente que los valores de pixel muy altos debido a píxeles calientes no eclipsaban el ruido.

3.2. Determinación de los tiempos de exposición

Llamamos z_{ij} al valor de cada píxel en posición i y con exposición Δt_j . La función de respuesta del sensor, $z_{ij} = f(X_{ij}) = f(\Delta t_j \cdot E_i)$ depende de la exposición del sensor X_{ij} , que es el producto de la irradiancia por el tiempo de exposición. Esta función no tiene por qué ser lineal [8].

Debido a que todas las exposiciones se toman en menos de 1 ms, es perfectamente asumible que la escena es estática. Entonces E_i permanece constante para cada píxel i durante las 7 fotos, por lo que el único parámetro que varía es Δt .

Los algoritmos de HDR, conocido el tiempo de exposición, determinan la función respuesta y su inversa para recuperar E_i . Sin embargo, debido a que hay cierta incertidumbre en el Δt_j de las capturas de esta cámara, se sigue un procedimiento distinto. Se busca en su lugar determinar una relación entre tiempos trabajando en la zona de respuesta lineal del sensor.

3.2.1. Estudio de la linealidad del sensor

La función respuesta f no suele ser lineal con niveles de exposición bajos debido a la presencia de ruido en el sensor. Con alta exposición, los píxeles se saturan y la respuesta crece mucho más lentamente. Para exposiciones intermedias, en general, existe una región en la que la relación entre X y Z es lineal.

Esto depende del tipo de píxel con el que se construye el sensor.

Eliminado el ruido y los píxeles con señal superior a la de un umbral de saturación $z = 65400$, se representó el cociente entre píxeles $z(\Delta t_j)/z(\Delta t_{j'})$ para cada par de imágenes que forman cada una de las 7 exposiciones, cada canal por separado. Se comprobó así que la constante de proporcionalidad no dependía del valor de z , y que era similar para las tres longitudes de onda (Ver figuras en el Anexo B).

Esta constante indica que la función es lineal y entonces podemos asumir que la relación entre tiempos es el valor del cociente $\Delta t_j/\Delta t_{j'}$, dado que

$$\frac{z_{ij}}{z_{ij'}} = \frac{kE_i\Delta t_j}{kE_i\Delta t_{j'}} = \frac{\Delta t_j}{\Delta t_{j'}} \quad (3.1)$$

3.2.2. Cálculo de los tiempos de exposición relativos

Establecidos los valores umbral máximo y mínimo de z , se toman los cocientes en cada píxel i dentro del este rango para todas las combinaciones posibles de Δt_j y se toma la mediana de esos cocientes en i .

Después de promediar las tres longitudes de onda, estos valores son representados en una matriz C de diagonal unidad, cuyos elementos representan las relaciones entre tiempos de exposición.

$$C = \begin{pmatrix} 1 & z_{i0}/z_{i1} & \dots & z_{i0}/z_{i6} \\ z_{i1}/z_{i0} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots \\ z_{i6}/z_{i0} & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & t_0/t_1 & \dots & t_0/t_6 \\ t_1/t_0 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots \\ t_6/t_0 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Cada una de sus columnas contiene la información de la relación de tiempos tomando como denominador solamente una de las imágenes. Para construir el mapa de radiancia, se utilizan las relaciones de tiempos respecto a t_6 , el tiempo de exposición mayor. :

$$\frac{t_i}{t_6} = \frac{1}{N} \sum_k^N t_i/t_k \cdot t_k/t_6 \approx \frac{1}{N} \sum_k^N \overline{z_i/z_k} \cdot \overline{z_k/z_6} \quad (3.3)$$

Donde $\overline{z_i/z_k}$ representa el promedio de todos los cocientes entre los píxeles de las exposiciones i y k .

Para obtener los mejores resultados, se utiliza el mayor numero de imágenes posible, garantizando previamente que se han tomado bajo condiciones similares: misma configuración de la cámara, sin cambiar el tiempo de exposición ni la ganancia. Se toma la lista de relación de tiempos normalizada al último tiempo de cada imagen y se promedian. En el trabajo se han utilizado un total de 168 imágenes, desde las 6:00 hasta las 19:55.

3.2.2.1. Valor de los tiempos de exposición relativos

Se presenta en la tabla 3.1 los tiempos relativos de cada exposición respecto al de la captura más larga, comparados con los nominales con los que se configuró la cámara.

Tabla 3.1: Tabla de tiempos relativos

	t_0/t_6	t_1/t_6	t_2/t_6	t_3/t_6	t_4/t_6	t_5/t_6	t_6/t_6
Nominales	0.03125	0.04167	0.0625	0.125	0.25	0.5	1
Calculados	0.02365	0.04571	0.06779	0.13421	0.24479	0.48848	1

3.3. Construcción del mapa de radiancia

Llamamos X_i al mapa de radiancia lineal que vamos a construir, donde i es un índice que indica la ubicación del píxel. Se toma para cada píxel i el valor de la imagen de mayor exposición sin saturar (con tiempo t_j), con el objetivo de minimizar el efecto del ruido. Se divide este valor entre t_j/t_6 . Este cociente es la relación de tiempos de exposición entre la captura de donde se extrae el valor y la captura de exposición máxima, que es la que estamos tomando de referencia.

$$X_i = z_{ij(i)} \cdot \frac{t_6}{t_j(i)} \quad (3.4)$$

Cada píxel del sensor tiene solamente información acerca de una de las longitudes de onda, de acuerdo al filtro Bayer de la cámara (Figura 3.1). Se interpola el resto de puntos de cada canal promediando el de sus vecinos inmediatos. Este proceso se llama interpolación cromática (demosaicing).

En fotografía, después se aplicarían métodos de mapeo tonal para simular la respuesta del ojo humano y generar una foto visible. Un ejemplo sería el algoritmo Reinhard [9]. Para el objetivo de este trabajo es necesario conservar el mapa lineal, por lo que no es necesario realizar ningún postprocesado de este tipo. No obstante, resulta útil para visualizar el estado del cielo y comprobar de forma manual la presencia de nubes (Ver figuras 4.2 y 4.9).

3.4. Calibración geométrica

El último paso es encontrar una función de calibración que asigne a cada punto del cielo coordenadas en la imagen teniendo en cuenta la deformación ocasionada por la lente y el desplazamiento del centro debido a la orientación de la cámara.

Esta calibración puede realizarse de varias maneras. En un laboratorio con una imagen de referencia o usando imágenes tomadas en la ubicación final de la cámara, ya sea usando la posición de la luna, el sol u otros astros. Para este trabajo se ha usado la calibración estelar.

La calibración estelar usa imágenes nocturnas donde hay astros que son identificables. Conocida la ubicación, fecha y hora exactas en las que se tomó la fotografía, se compara la posición de los planetas o estrellas en la imagen respecto al cenit y acimut dado por una librería de efemérides como *pyephem*. Tomando suficientes puntos, se determina el centro y el giro de la cámara usando los acimuts y la función de calibración usando cenits.

El alumno experimentó con el código para la calibración tomando solamente Júpiter como referencia. Las matrices y función de calibración final de la cámara usadas para la realización del trabajo han sido aportadas por el tutor Juan Carlos Antuña.

3.5. Muestreo de datos y comparación con fotómetro

Se han descargado de AERONET [10] las medidas tomadas a lo largo del 6 de julio de 2019, con calidad nivel 2. De acuerdo las longitudes de onda efectivas de la cámara (Sección 2.1), se han elegido para comparar las longitudes de onda más cercanas: 675.1, 500.8 y 440.3 nm.

Se ha cargado en python el archivo *.csv* mediante la librería *pandas*. Las medidas vienen dadas en función del acimut relativo al sol. Para conseguir el acimut absoluto, se calculan las coordenadas del sol usando las coordenadas de Valladolid, la fecha y la hora con la librería *pyephem*. Sumando el azimut solar nos queda una lista de radiancias en tres longitudes de onda para cada ángulo. Dado que el movimiento del fotómetro realiza varios barridos y pasa varias veces por algunos puntos, hay medidas repetidas para algunos ángulos, que deben promediarse.

A continuación, se busca el mapa de radiancia de radiancia más reciente. Como la cámara captura uno cada 5 minutos, el tiempo máximo entre el mapa y las medidas del fotómetro no superará los 2.5 minutos. Se usa la función de calibración para muestrear el perfil de almucantar con cenit solar y los valores de acimut para los que se ha medido con el fotómetro.

Debido a que el mapa de radiancia es relativo, para comparar su perfil con el del fotómetro ambos se normalizan previamente. Para ello, se divide cada punto por la suma de todos los de la misma longitud de onda. La suma de todas las medidas para una longitud de onda de cada instrumento sera entonces 1.

A parte de representarlas gráficamente, para cuantificar la diferencia entre ambas medidas se ha calculado su resta en valor normal, $(Camara - Fotometro)$ y en porcentaje, $100 \cdot (Camara - Fotometro) / Fotometro$.

Capítulo 4

Resultados

En este apartado se comentaran los resultados más relevantes. El resto de gráficas se incluyen en el Apéndice A.

En las figuras 4.1 y 4.2 se presenta el estado del cielo y los puntos tomados en la primera de las medidas.

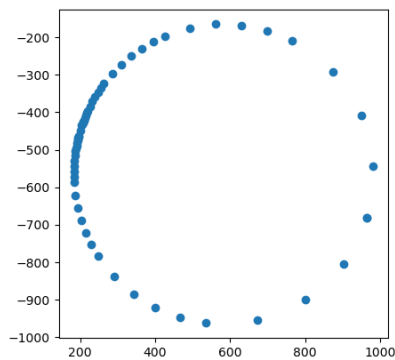


Figura 4.1: Coordenadas de los píxeles muestreados en el HDR a las 6:25

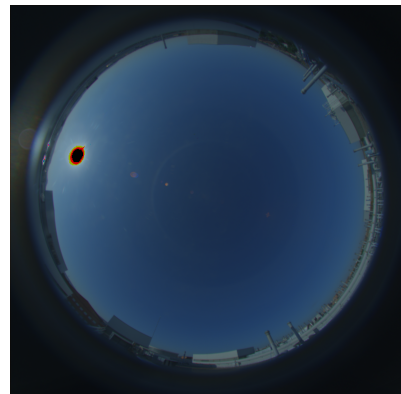


Figura 4.2: Imagen del cielo a las 6:25 procesada con mapeado de tono

El cielo está despejado y hay ausencia de nubes. Cerca del sol se puede apreciar que se satura primero el canal azul, luego el verde y por último el rojo.

Se representa en las figuras 4.3 y 4.4 los perfiles de almucantar obtenidos con la cámara y con el fotómetro. Se observa que ambas gráficas siguen formas muy similares.

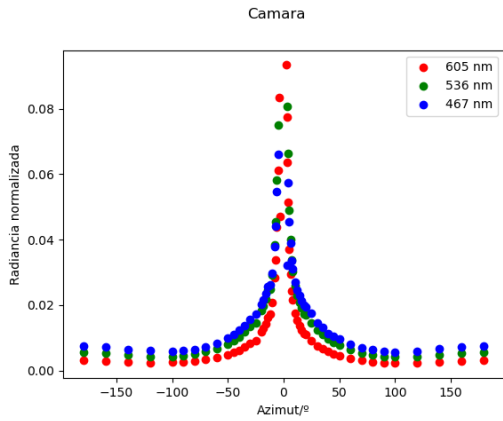


Figura 4.3: Perfil de almucantar de la cámara a las 6:25

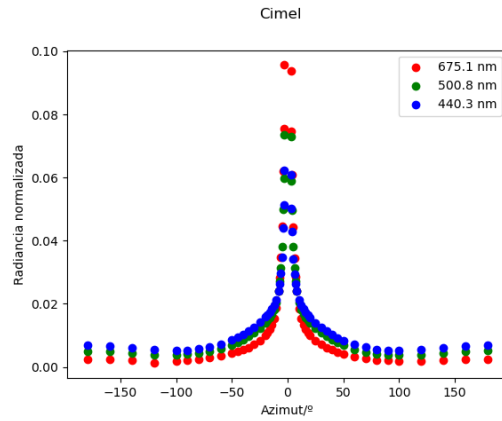


Figura 4.4: Perfil de almucantar del fotómetro a las 6:25

A continuación, se compara en la figura 4.5 cada longitud de onda por separado. Los resultados obtenidos con la cámara se aproximan mucho a los del fotómetro. En el centro es donde se encuentra mayor diferencia. Esto puede deberse a dos factores. El primero son los reflejos en la cámara que pueden hacer que la señal sea mayor. El segundo es la precisión en el ángulo de acimut. Cerca del sol, la radiancia varía muy rápidamente. Para compensarlo, el fotómetro reduce la distancia entre medidas aumentando la frecuencia. La cámara, por otra parte, tiene una resolución espacial constante que solo varía con el cenit al proyectar a coordenadas horizontales. Aun así, es relevante el hecho de que se logra una resolución máxima cuando el sol está cerca del horizonte.

Estas diferencias en los valores del centro pueden afectar a la normalización de los datos, y explicar el ligero offset vertical que se observan en los canales verde y azul.

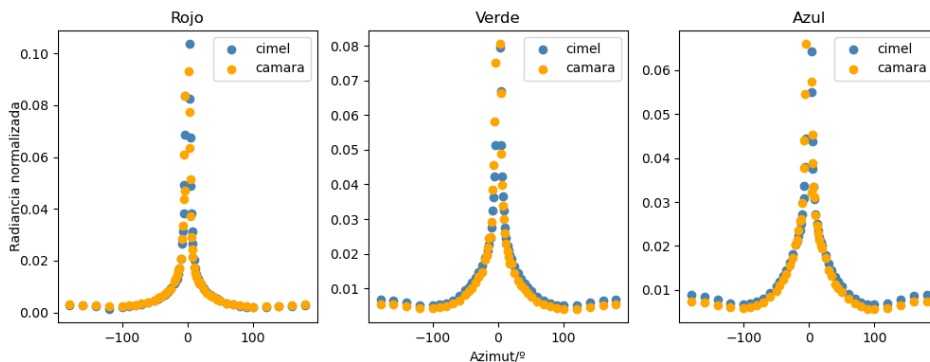


Figura 4.5: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 06:25

Representando la diferencia entre las dos gráficas (Figura 4.6) observamos que para el rojo es negativa a la derecha del sol y positiva a la izquierda. Esto

puede sugerir que hay un desplazamiento entre el centro de las dos gráficas. Podemos atribuir este desfase a la diferencia de tiempo entre la toma de la imagen y la medida por parte del fotómetro. Otra posible explicación serían reflexiones internas, aunque esto es poco probable debido a que la simetría de la cámara no debería favorecer ninguna dirección.

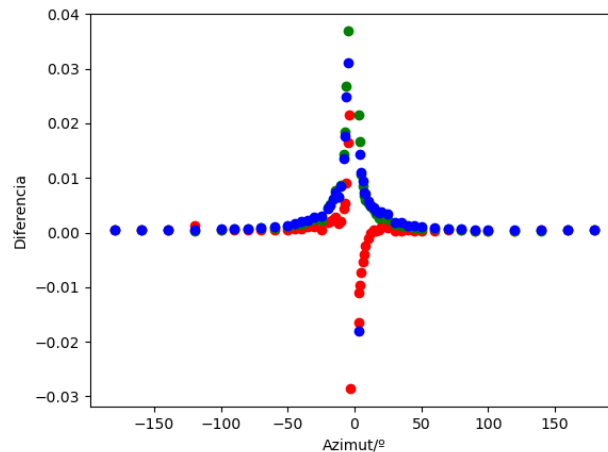


Figura 4.6: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara

El error en porcentaje (Figura 4.7) se encuentra en torno al 20% pero aumenta considerablemente cerca del centro. Inicialmente podríamos atribuírselo al desplazamiento ya mencionado antes, pero también sucede en el resto de gráficas, donde el error tiene el mismo signo ambos lados del 0°. El motivo más probable son las reflexiones del sol. La media de estos errores se presenta en la tabla 4.1.

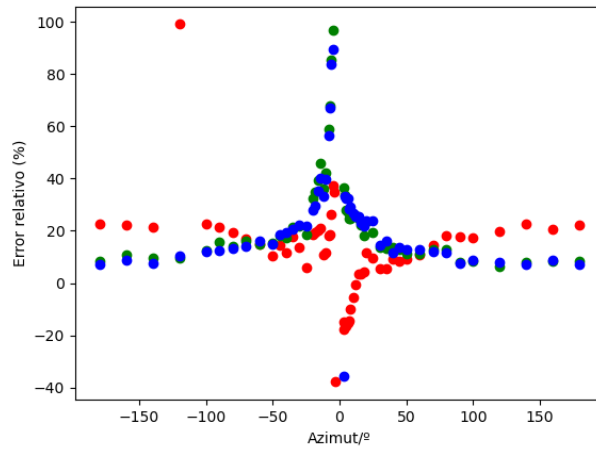


Figura 4.7: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara

Tabla 4.1: Media y desviación estándar de la diferencia absoluta y relativa entre cámara y fotómetro en la medida a las 06:25

	Rojo	Verde	Azul
Diferencia media	4.19E-05	4.93E-03	4.20E-03
σ	6.50E-03	7.29E-03	6.87E-03
Error relativo medio	0.119	0.240	0.224
σ	0.185	0.186	0.194

A continuación se presenta otro caso interesante. En la figura 4.9 se puede apreciar la presencia de nubes cerca del sol.

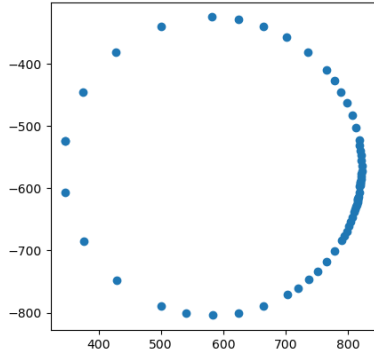


Figura 4.8: Coordenadas de los píxeles muestreados en el HDR a las 15:40

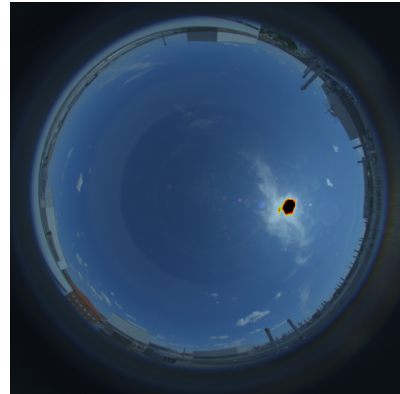


Figura 4.9: Imagen del cielo a las 15:40 procesada con mapeado de tono

Las nubes que cubren parte del cielo generan cierta asimetría en los perfiles de la cámara (4.10) y el fotómetro (4.11).

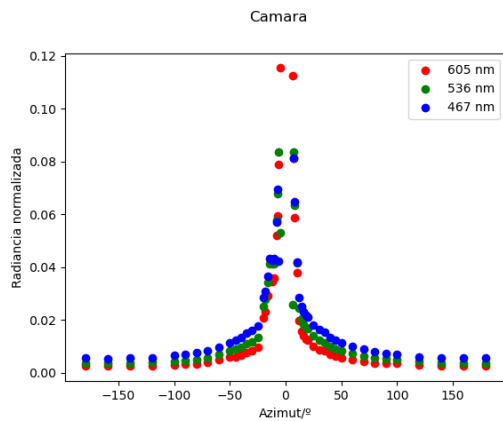


Figura 4.10: Perfil de almucantar de la cámara a las 15:40

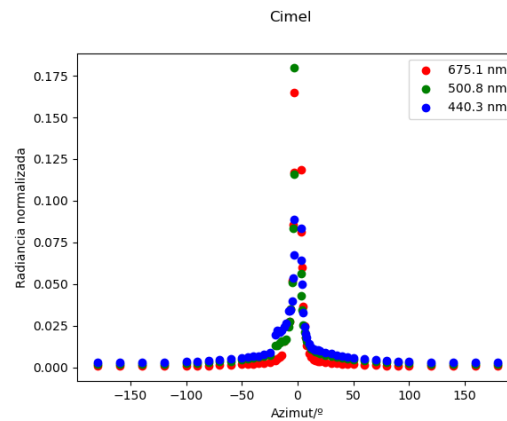


Figura 4.11: Perfil de almucantar del fotómetro a las 15:40

Separando las longitudes de onda en la figura 4.12, se aprecia una ligera discontinuidad a la izquierda en los tres canales. Aunque no hemos tenido en cuenta la presencia de nubes en el trabajo, los datos descargados de AERONET si que filtran las nubes. Todos los puntos saturados o con nubes venían señalados con un valor negativo fijo de -999.0. A la hora de comparar los resultados solo se han usado los ángulos en los que había datos comunes para ambos instrumentos.

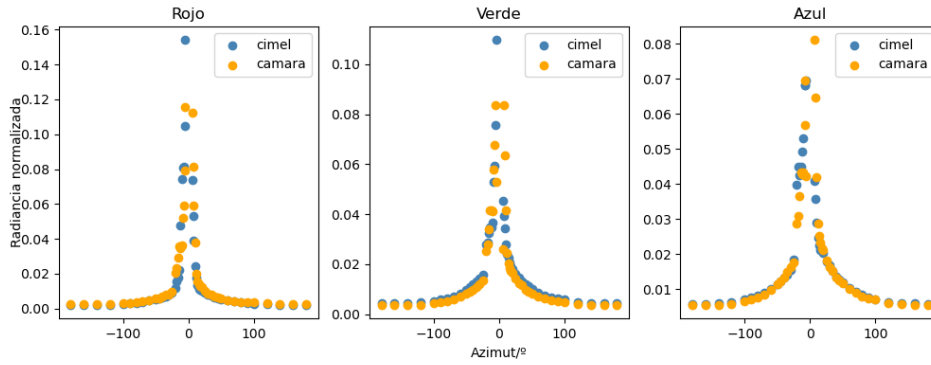


Figura 4.12: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 15:40

Representando la diferencia entre las dos gráficas (Figura 4.13) observamos que la diferencia aumenta en el centro como en el resto de los casos.

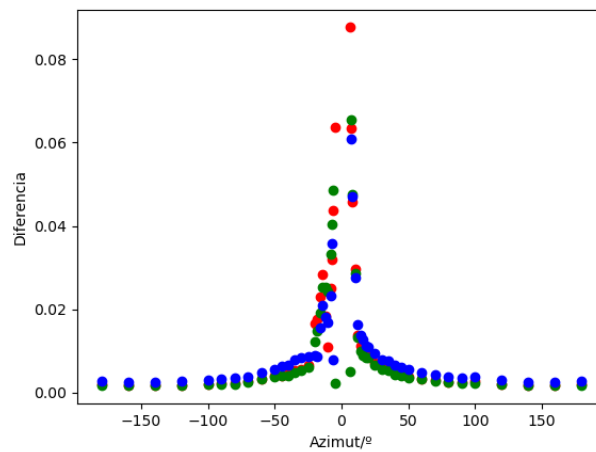


Figura 4.13: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara

En el error en porcentaje (Figura 4.14) se destaca la diferencia en los tres canales en los ángulos con presencia de nubes.

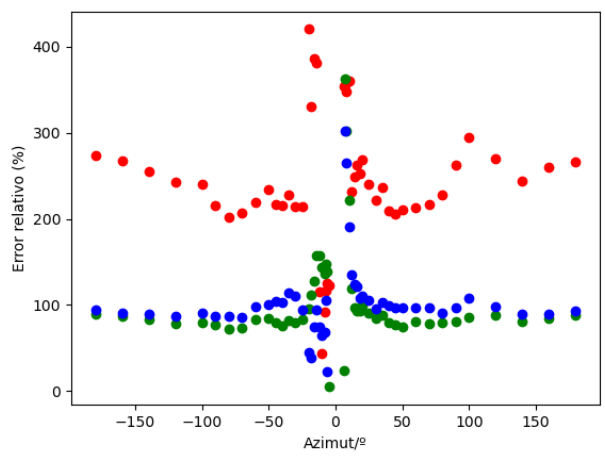


Figura 4.14: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara

Capítulo 5

Conclusiones

La primera conclusión es que se puede obtener con éxito mapas de radiancia lineal sin conocer previamente los tiempos de exposición. Se han comparado los resultados con las medidas de otro instrumento llegando a la conclusión de que ambas curvas son comparables, al menos de manera relativa.

El alumno ha adquirido mucha experiencia en el lenguaje de programación Python. Se ha familiarizado con el formato de archivos usados por las cámaras y con la red AERONET para la descarga de la información necesaria. La mayor parte del trabajo ha consistido en escribir programas para el tratamiento de estos datos y con ellos se pueden generar los mapas de radiancia de manera casi automática. Los scripts pueden ser compatibles con otras cámaras de cielo, como ya ha comprobado el alumno con una cámara instalada en Ny-Ålesund también operada por el GOA-UVa.

El trabajo también ha proporcionado una introducción básica al funcionamiento de los sensores CMOS y al tratamiento de imágenes. Resultaría interesante profundizar en la mejora de la calidad de las imágenes realizando sustracción de fotogramas oscuros y corrección de campo plano para trabajar con imágenes nocturnas.

Comparando la radiancia relativa con los valores obtenidos de otros instrumentos se podrían calcular mapas de radiancia absoluta. Un posible trabajo futuro sería la aplicación de algoritmos de inversión, como el algoritmo GRASP, a estos mapas de radiancia de cielo para la determinación de propiedades de aerosoles.

Apéndice A

Comparación de resultados y errores para todas las medidas del 6 de julio de 2019

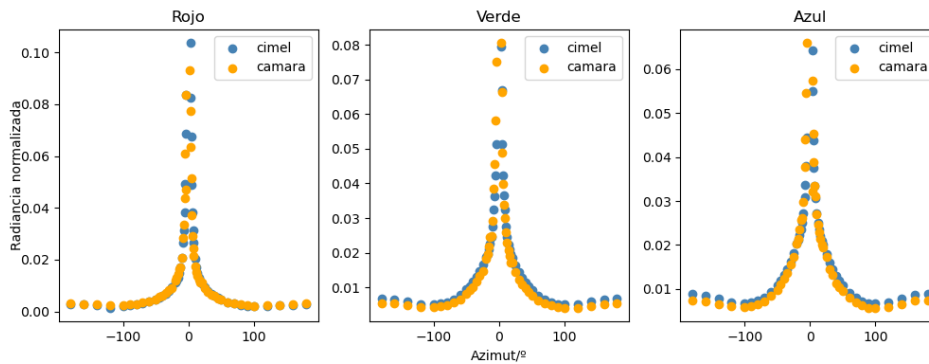


Figura A.1: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 06:25

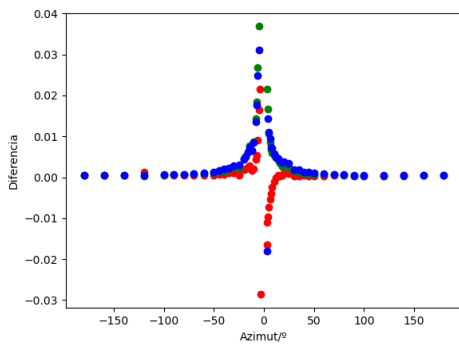


Figura A.2: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

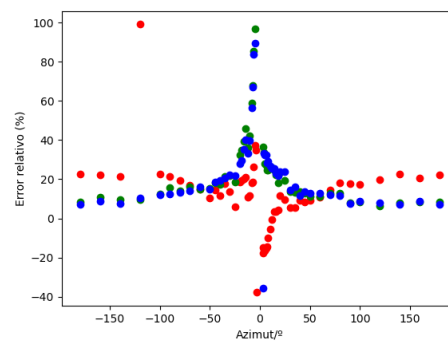


Figura A.3: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

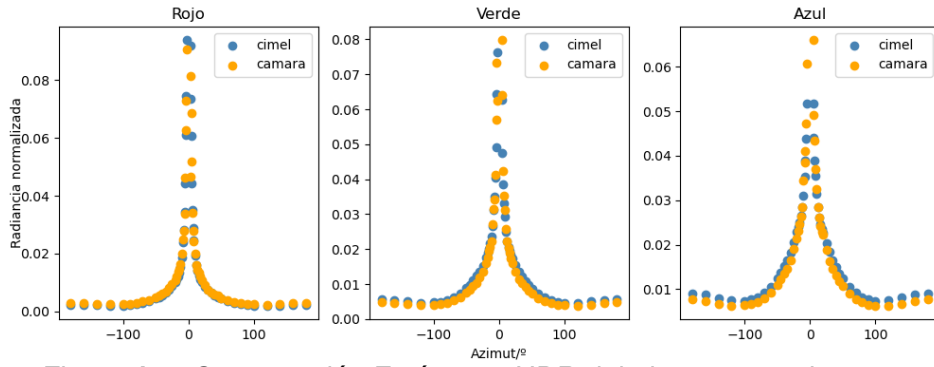


Figura A.4: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 07:50

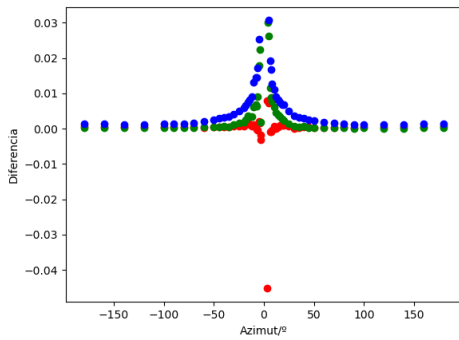


Figura A.5: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

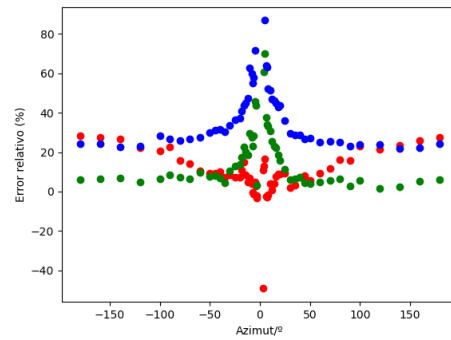


Figura A.6: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

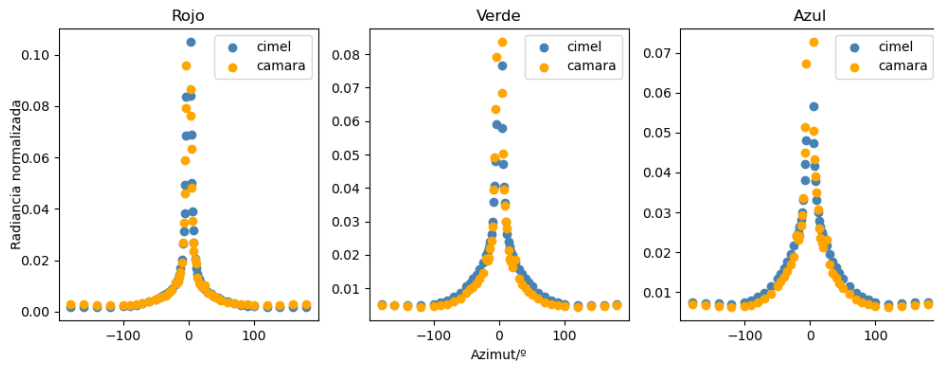


Figura A.7: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 08:00

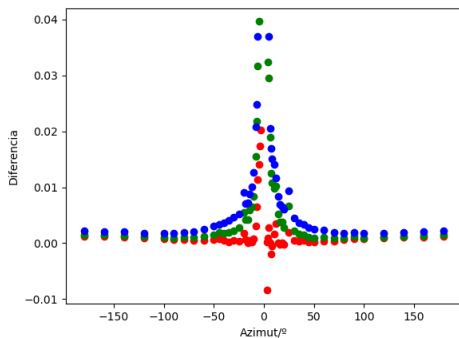


Figura A.8: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

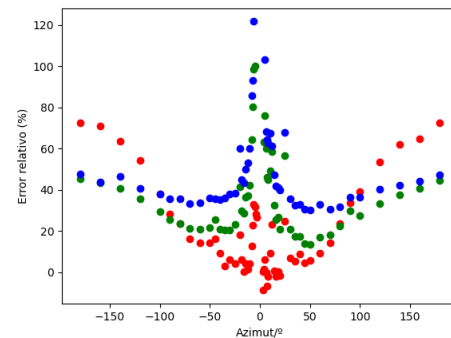


Figura A.9: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

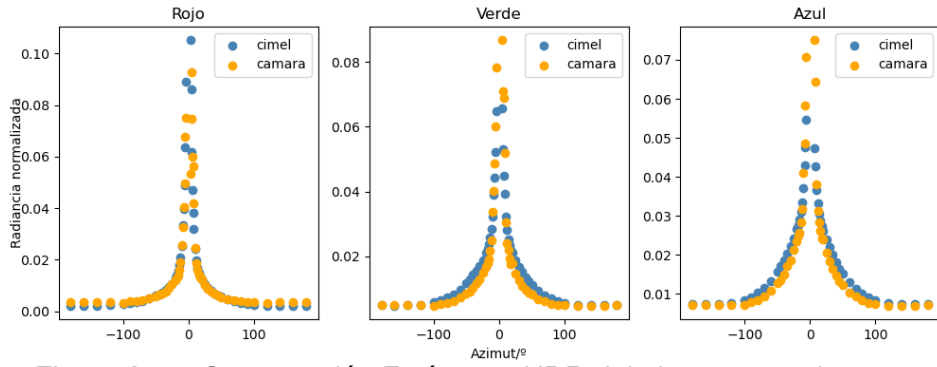


Figura A.10: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 08:35

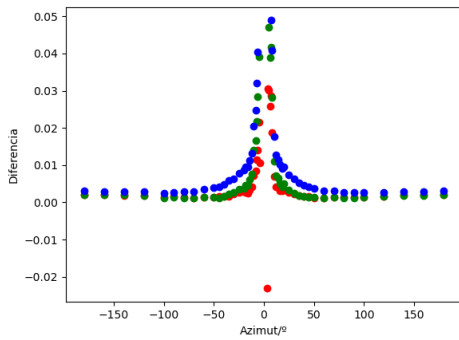


Figura A.11: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

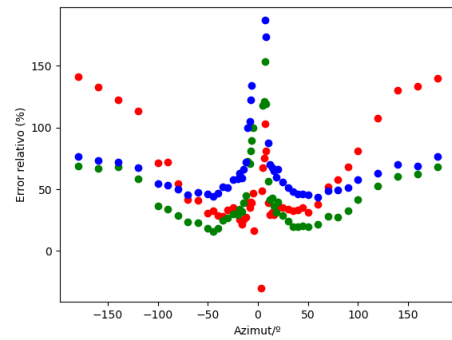


Figura A.12: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

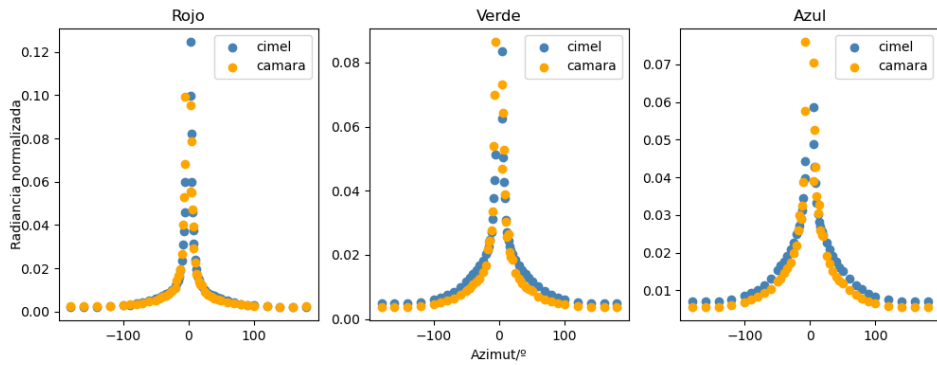


Figura A.13: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 08:50

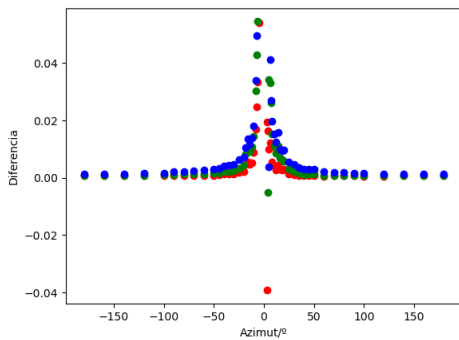


Figura A.14: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

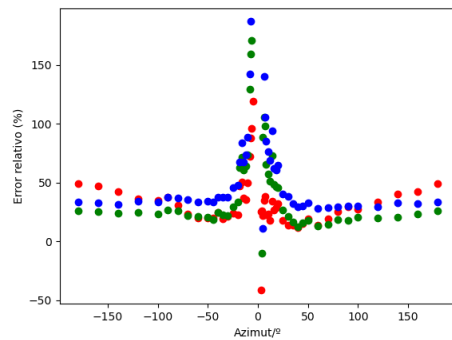


Figura A.15: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

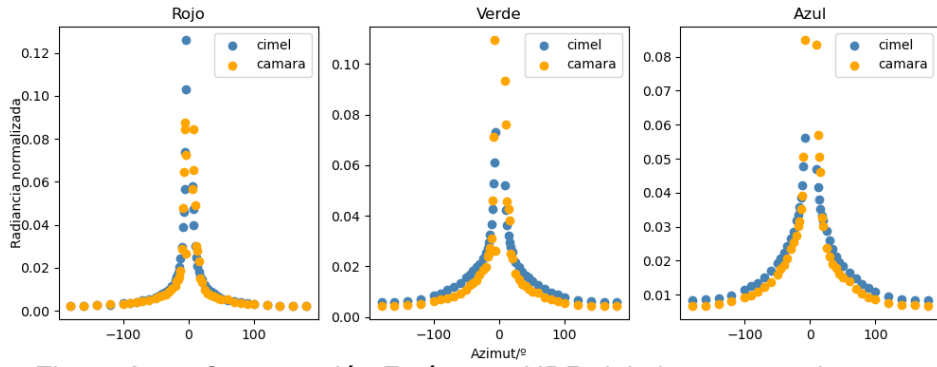


Figura A.16: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 09:40

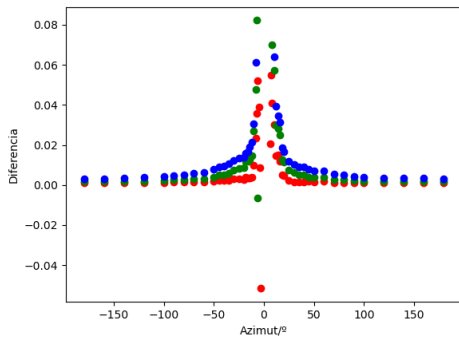


Figura A.17: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

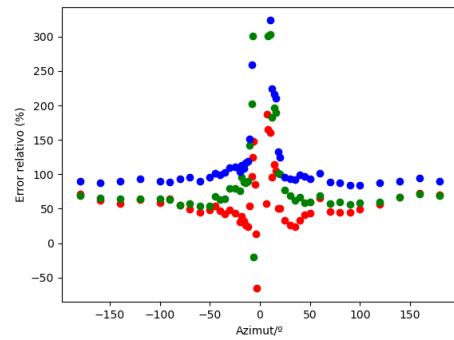


Figura A.18: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

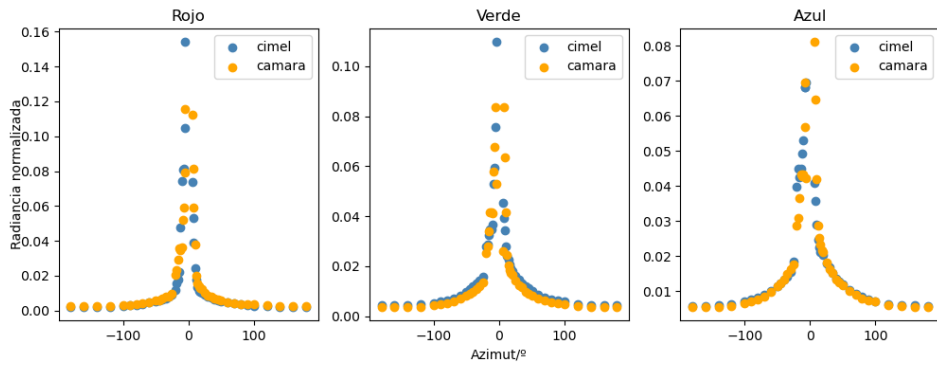


Figura A.19: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 15:40

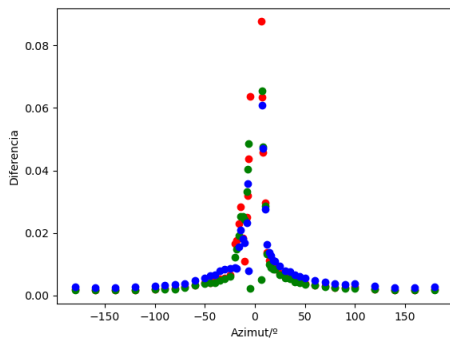


Figura A.20: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

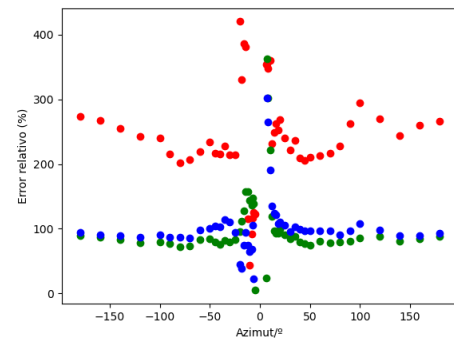


Figura A.21: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

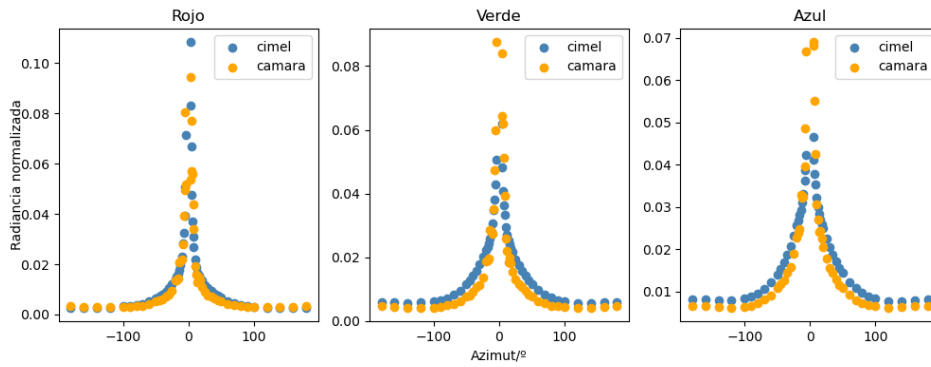


Figura A.22: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 16:35

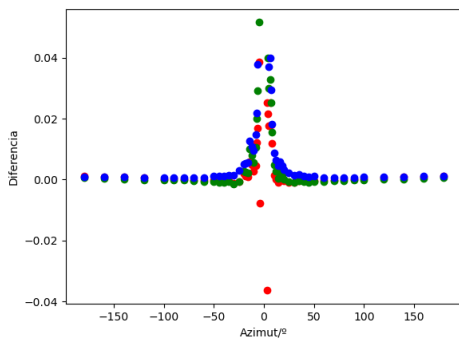


Figura A.23: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

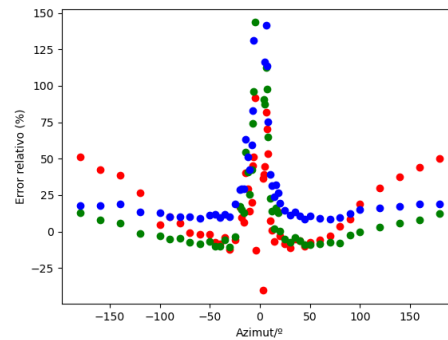


Figura A.24: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

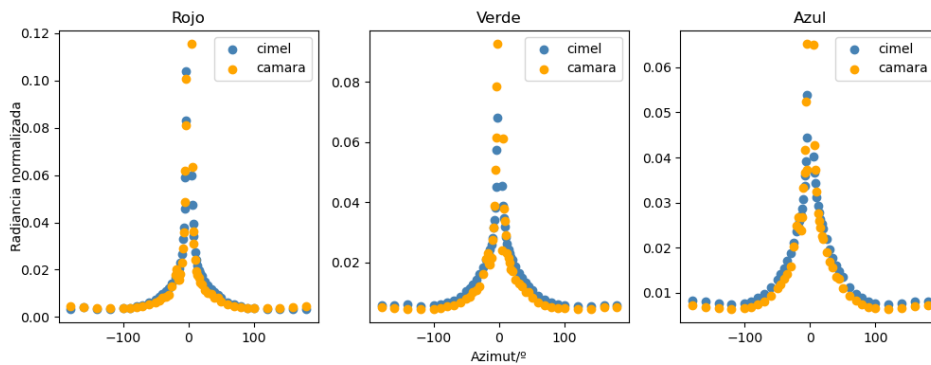


Figura A.25: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 16:55

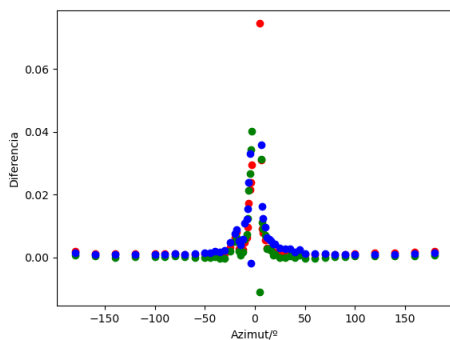


Figura A.26: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

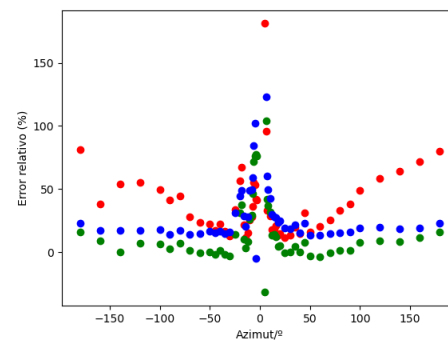


Figura A.27: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

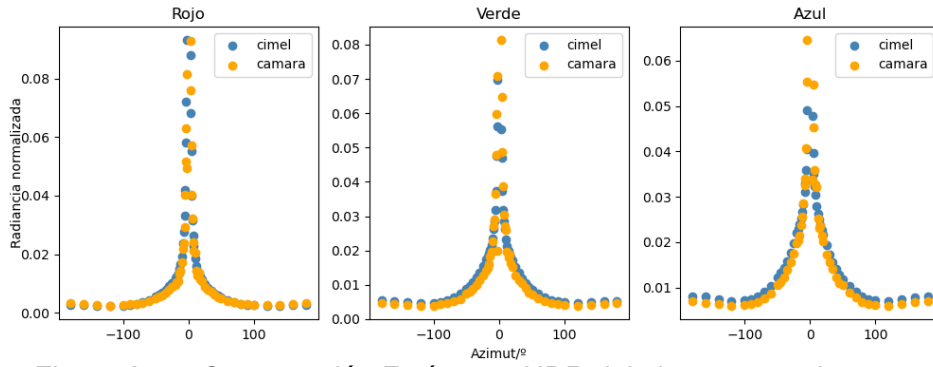


Figura A.28: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 17:15

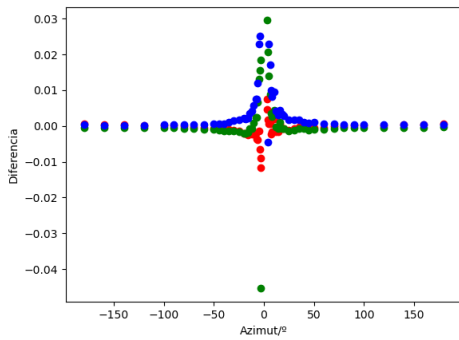


Figura A.29: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

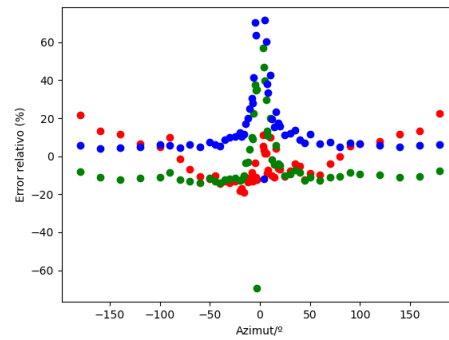


Figura A.30: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

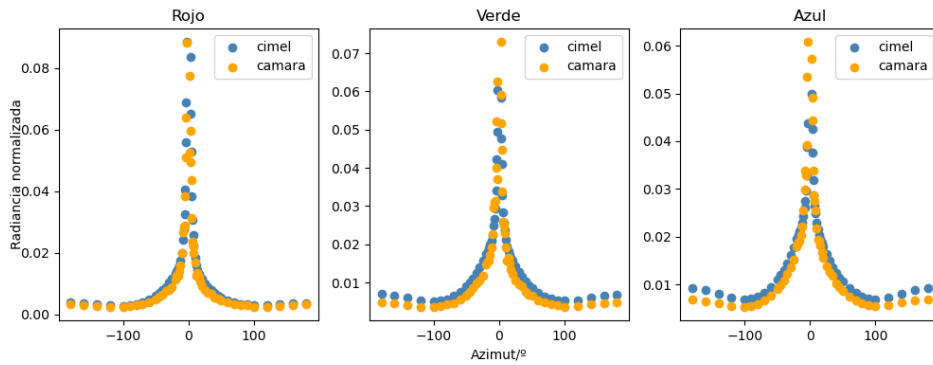


Figura A.31: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 18:10

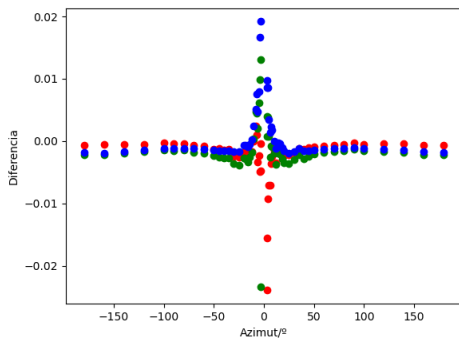


Figura A.32: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

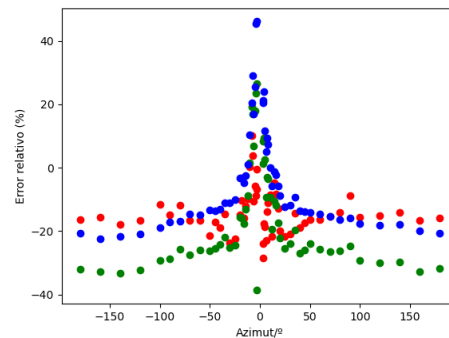


Figura A.33: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

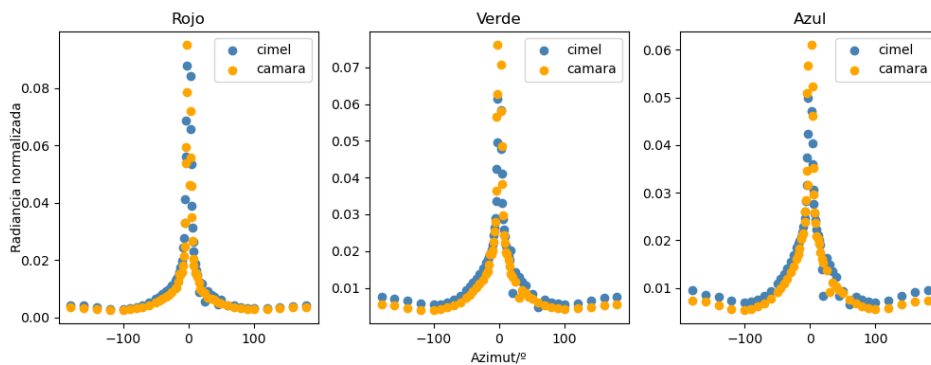


Figura A.34: Comparación Fotómetro-HDR del almucantar a las 18:30

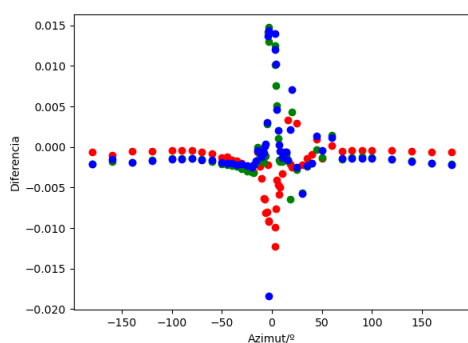


Figura A.35: Diferencia entre la radiancia normalizada del fotómetro y la cámara.

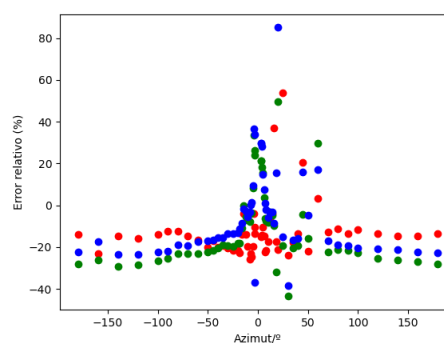


Figura A.36: Porcentaje de error entre el fotómetro y la cámara.

Apéndice B

Representación de cocientes para el estudio de la linealidad.

Se representan a continuación los cocientes entre cada par de exposiciones de una de las imágenes usada en el trabajo, tomada a las 13:10:00. En cada figura, se muestra un diagrama de dispersión de las tres longitudes de onda e histogramas bidimensionales con la densidad de puntos para cada valor del cociente y de z .

Se puede apreciar que al aumentar el tiempo de exposición los canales se van saturando. El más predominante en el cielo, el azul, es el primero en saturarse. Para los tiempos más largos sólo se tienen para el rojo, y se han omitido las últimas en las que no había suficientes píxeles sin saturar.

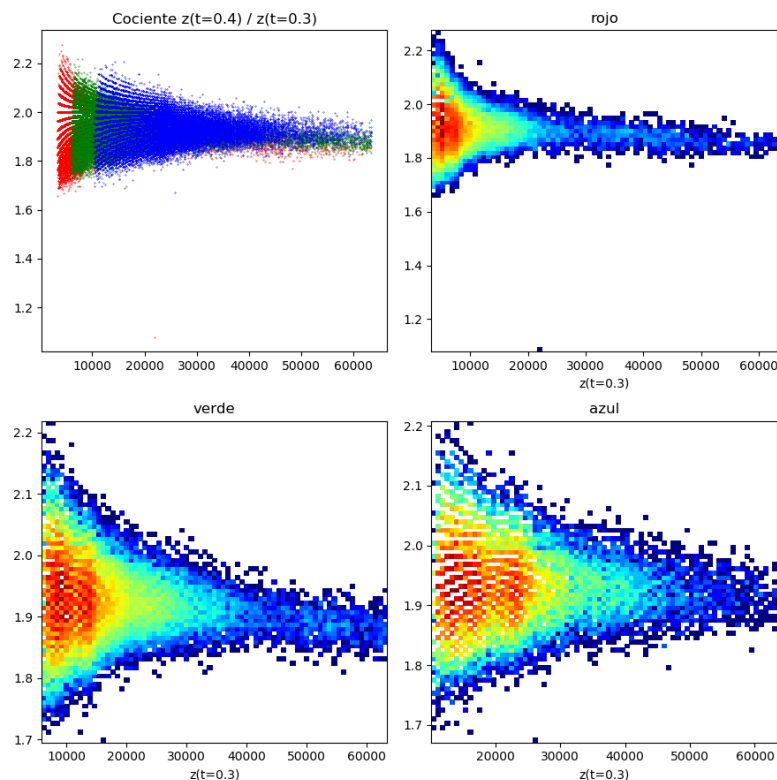


Figura B.1: Cociente entre las exposiciones de 0.4 y 0.3 μs

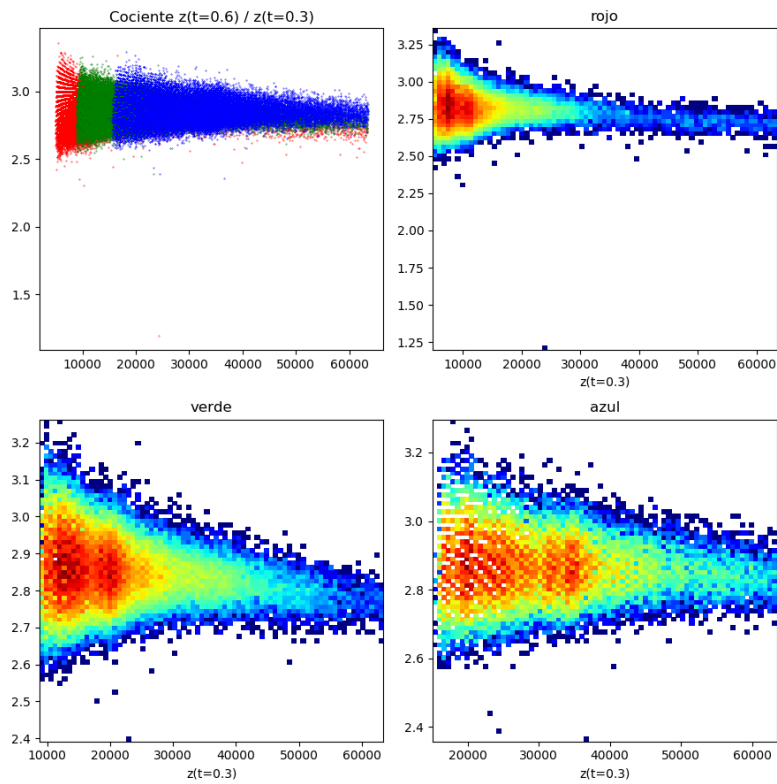


Figura B.2: Cociente entre las exposiciones de 0.6 y 0.3 μs

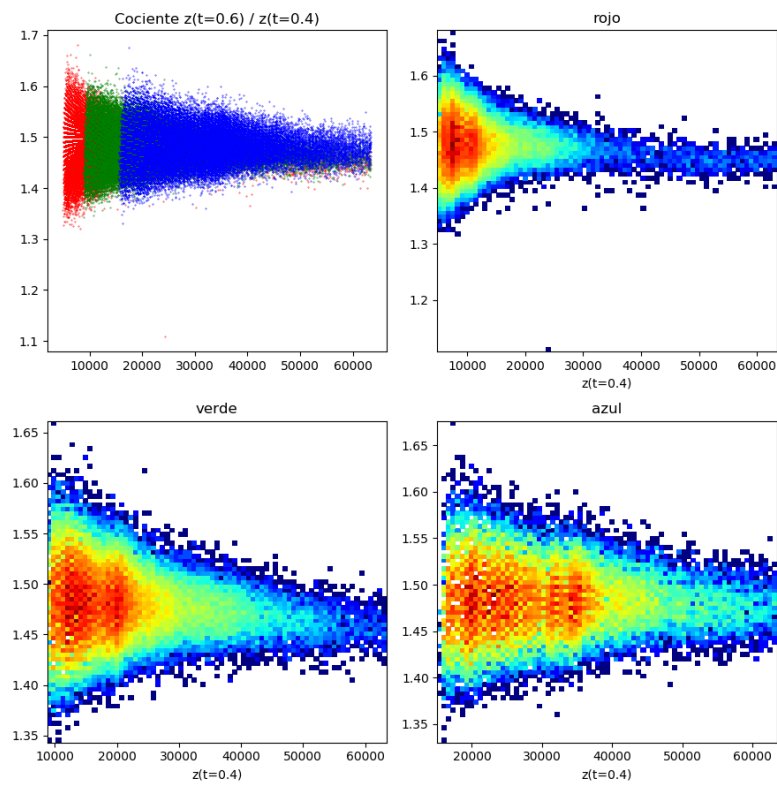


Figura B.3: Cociente entre las exposiciones de 0.6 y 0.4 μs

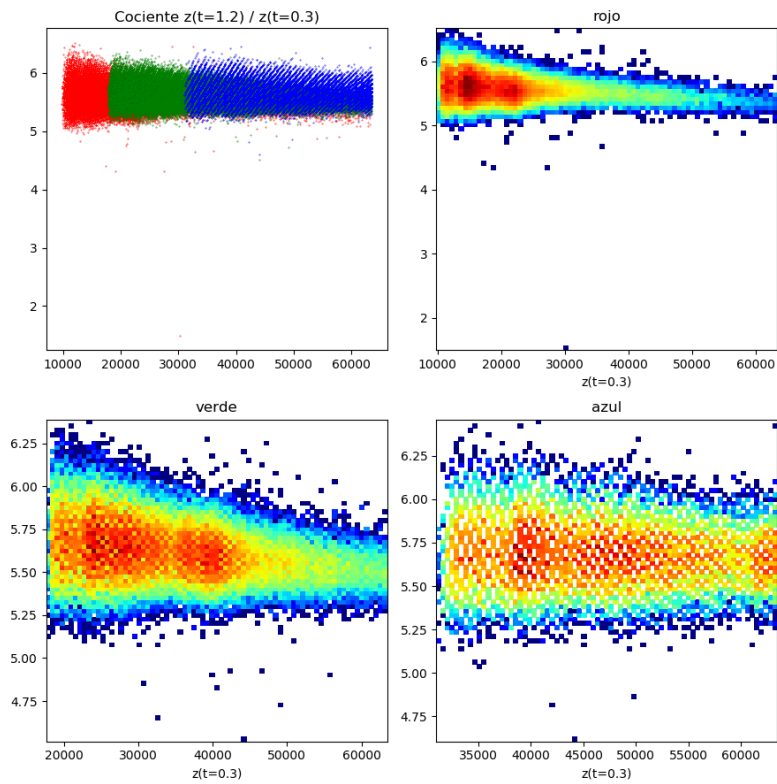


Figura B.4: Cociente entre las exposiciones de 1.2 y 0.3 μs

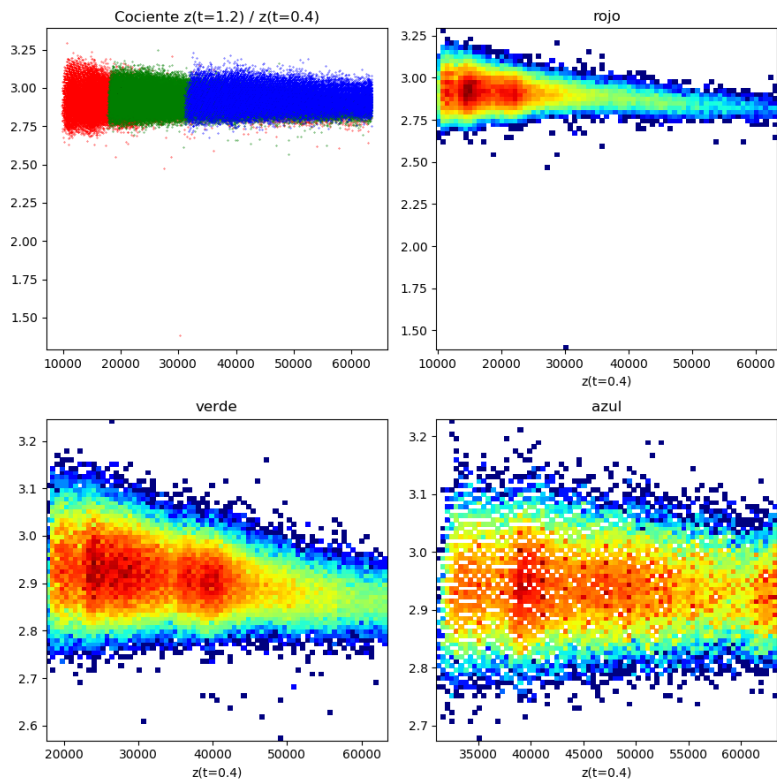


Figura B.5: Cociente entre las exposiciones de 1.2 y 0.4 μs

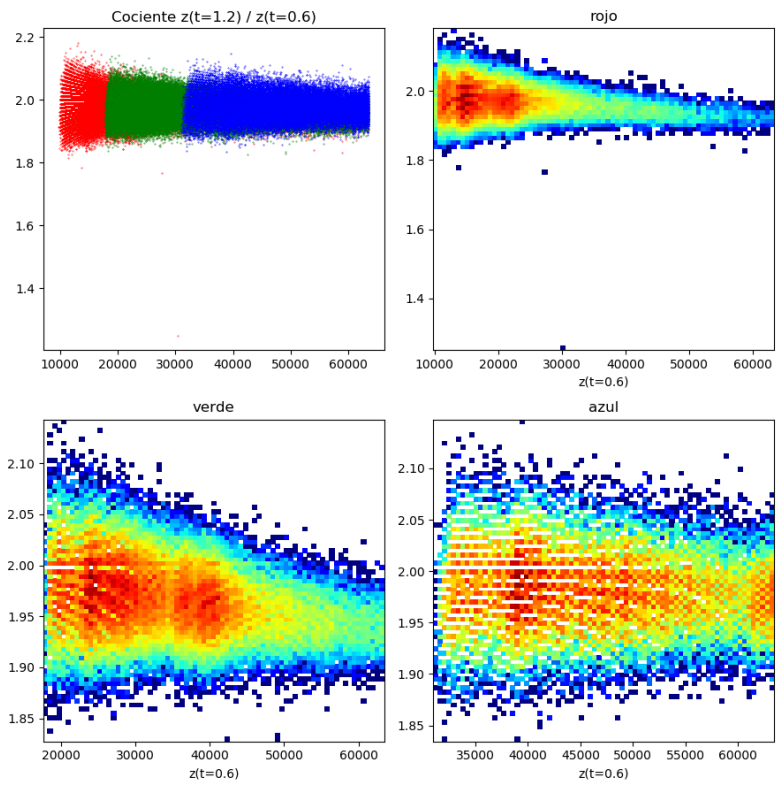


Figura B.6: Cociente entre las exposiciones de 1.2 y 0.6 μs

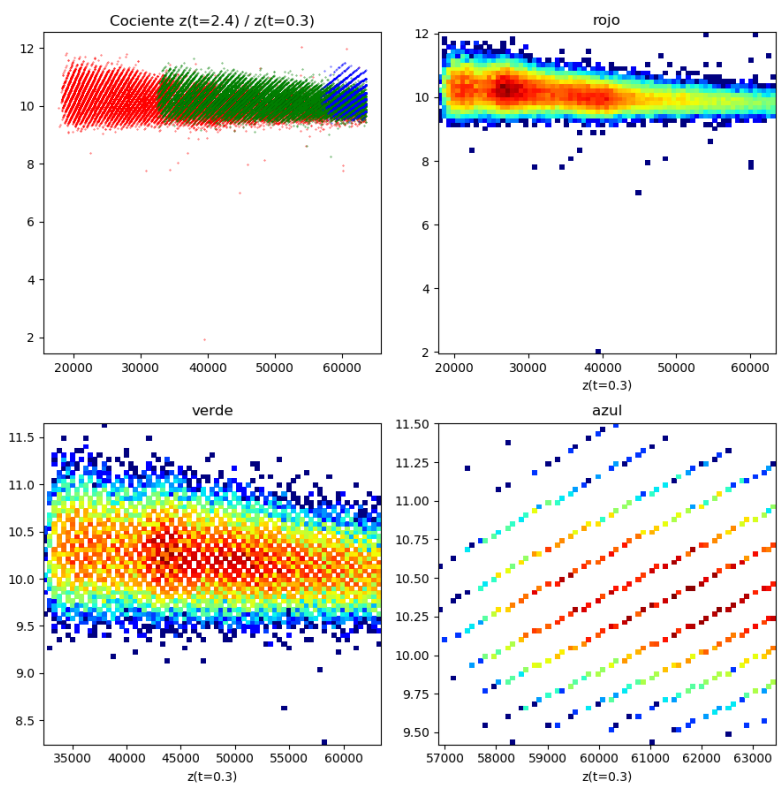


Figura B.7: Cociente entre las exposiciones de 2.4 y 0.3 μs

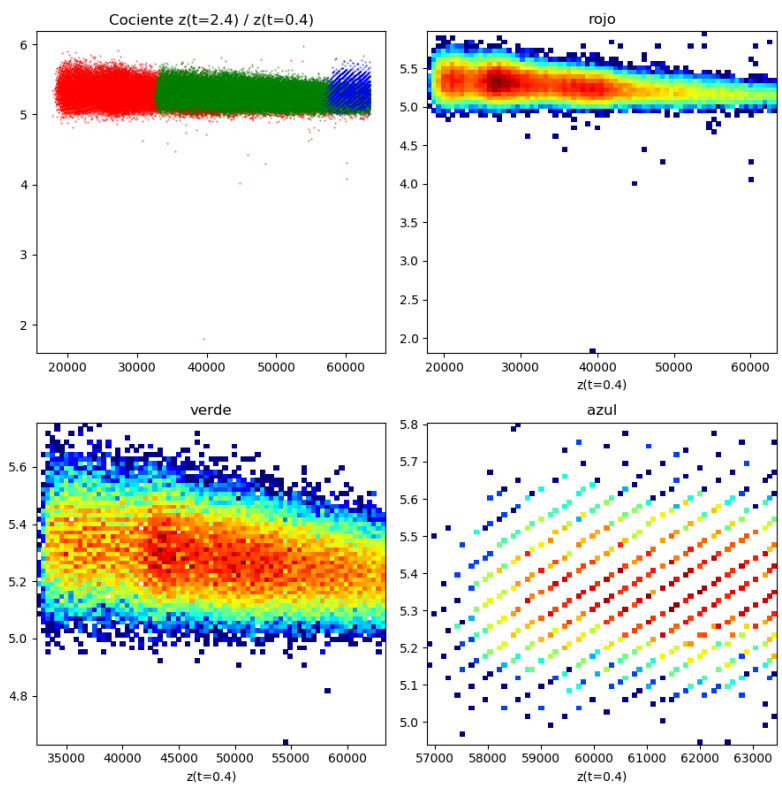


Figura B.8: Cociente entre las exposiciones de 2.4 y 0.4 μs

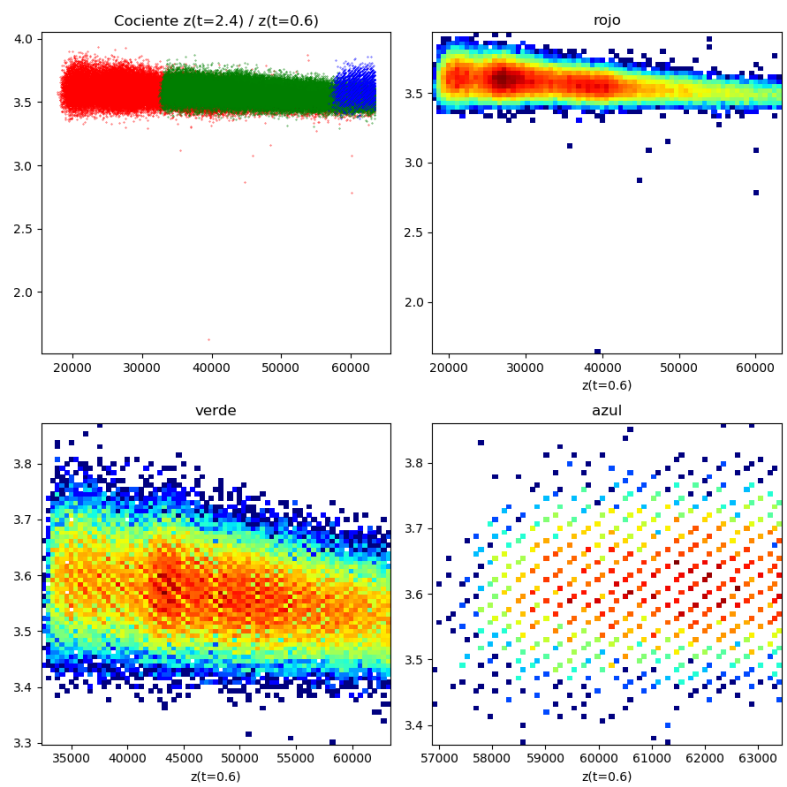


Figura B.9: Cociente entre las exposiciones de 2.4 y 0.6 μs

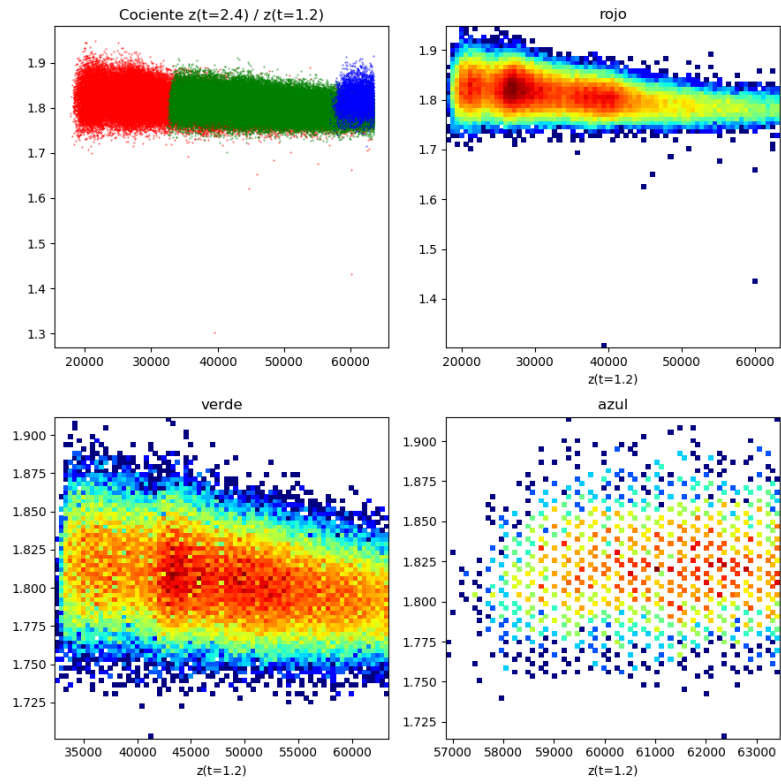


Figura B.10: Cociente entre las exposiciones de 2.4 y 1.2 μs

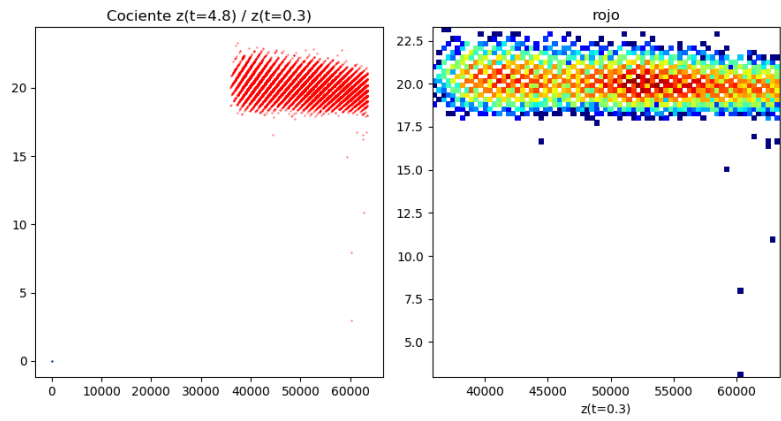


Figura B.11: Cociente entre las exposiciones de 4.8 y 0.3 μs

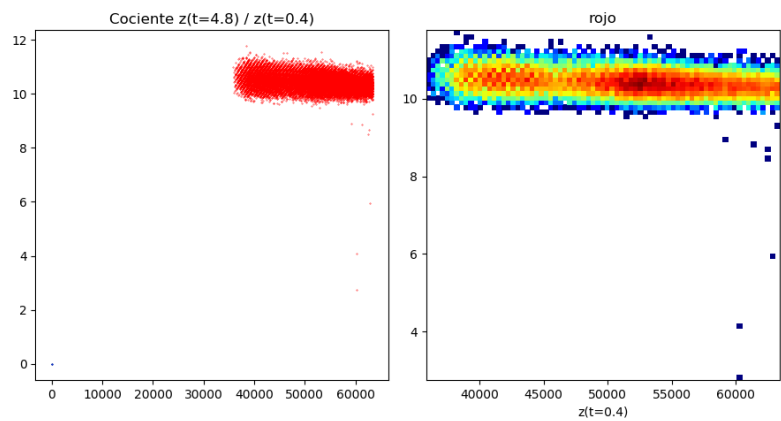


Figura B.12: Cociente entre las exposiciones de 4.8 y 0.4 μs

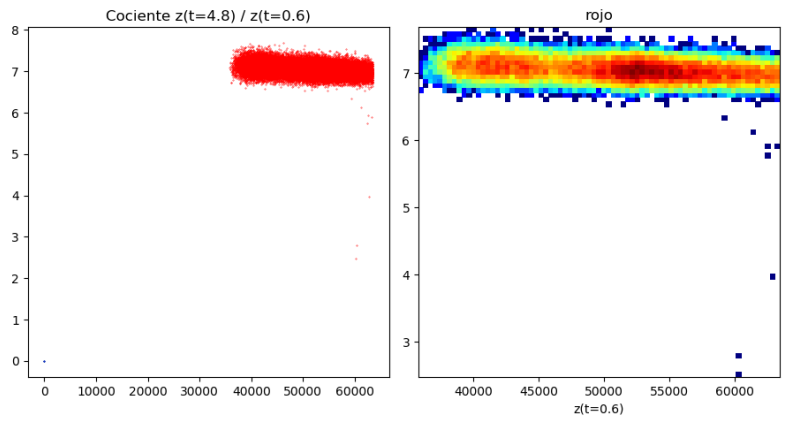


Figura B.13: Cociente entre las exposiciones de 4.8 y 0.6 μs

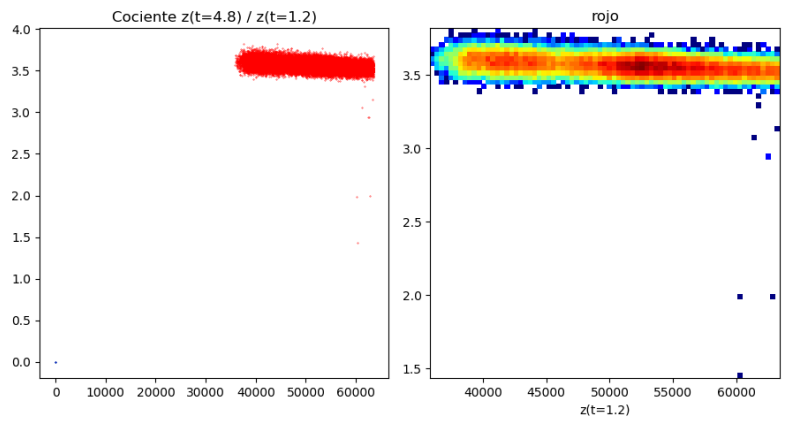


Figura B.14: Cociente entre las exposiciones de 4.8 y 1.2 μs

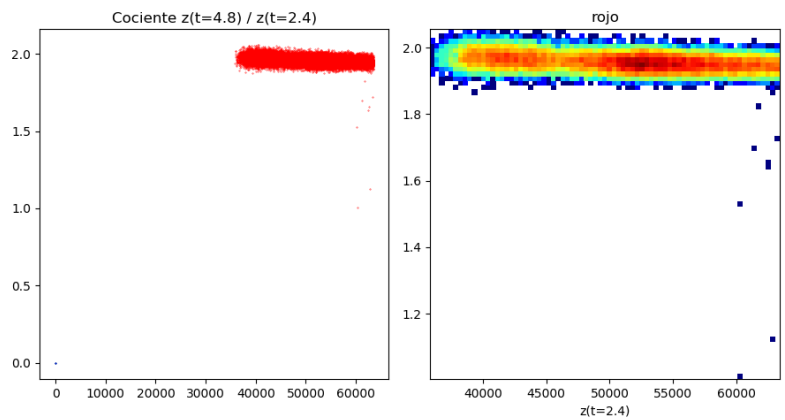


Figura B.15: Cociente entre las exposiciones de 4.8 y 2.4 μs

Bibliografía

- [1] O. Dubovik, T. Lapyonok, P. Litvinov, M. Herman, D. Fuertes, F. Ducos, A. Lopatin, A. Chaikovsky, B. Torres, Y. Derimian, X. Huang, M. Aspetsberger, and C. Federspiel, “Grasp: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere,” *SPIE Newsroom*, 09 2014.
- [2] B. Holben, T. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. Reagan, Y. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov, “Aeronet—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, no. 1, pp. 1 – 16, 1998. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425798000315>
- [3] R. Román, A. Cazorla, C. Toledano, F. Olmo, V. Cachorro, A. Frutos, and L. Arboledas, “Cloud cover detection combining high dynamic range sky images and ceilometer measurements,” *Atmospheric Research*, vol. 196, 06 2017.
- [4] R. Román, B. Torres, D. Fuertes, V. Cachorro, O. Dubovik, C. Toledano, A. Cazorla, Barreto, J. Bosch, T. Lapyonok, R. González, P. Goloub, M. Perrone, F. Olmo, A. Frutos, and L. Arboledas, “Remote sensing of lunar aureole with a sky camera: Adding information in the nocturnal retrieval of aerosol properties with grasp code,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 196, pp. 238–252, 07 2017.
- [5] A. Nguyen and J. Kleissl, “Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers,” *Solar Energy*, vol. 107, p. 495–509, 09 2014.
- [6] Román *et al.*, “Relative sky radiance from multi exposure all sky camera images,” 2020, in preparation.
- [7] W. Porter, B. Kopp, J. Dunlap, R. Widenhorn, and E. Bodegom, “Dark current measurements in a cmos imager,” 03 2008.

- [8] P. E. Debevec and J. Malik, "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs," in *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ser. SIGGRAPH '97. USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997, p. 369–378. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/258734.258884>
- [9] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 21, 05 2002.
- [10] AERONET. (2020) Aeronet data download tool. [Online]. Available: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/webtool_inv_v3?stage=3®ion=Europe&state=Spain&site=Valladolid&place_code=10&if_polarized=0