

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***SOFTWARE DE PROCESADO DE IMÁGENES
ASTRONÓMICAS MEDIANTE LUCKY-IMAGING:
PLAYLIST 2.0 DE PLANETCAM UPV/EHU***

Estudiante *Libe Olabarrieta Landa*

Director *Ricardo Hueso Alonso*

Curso académico *2020-2021*

Bilbao, septiembre 2021

RESUMEN

La observación astronómica es un campo que presenta una serie de desafíos. Un problema común a todos los telescopios es los defectos inducidos por el uso de componentes electrónicos. Los detectores, tanto CMOs como los CCD, tienen un efecto en las imágenes debido a su temperatura, este defecto precisa de un procesado llamado dark en referencia a la corriente de oscuridad que genera ruido en la imagen. Por otro lado, elementos ópticos y filtros deforman la imagen, lo que hace necesario otro procesado denominado flat. Además, en telescopios terrestres se le añade el problema de las turbulencias atmosféricas, esto hace que las imágenes precisen de técnicas de tratamiento para corregir los defectos que añade a las mismas. En este proyecto se realizan mejoras dentro del entorno PLAYLIST desarrollado en el lenguaje IDL. El objetivo de este programa es la mejora de imágenes astronómicas mediante su procesado. Se ha desarrollado una serie de mejoras en el procesado individual de Darks y Flats que permiten la automatización del programa. Además, se realizan retoques en otros aspectos además del añadido de una serie de funcionalidades extra. Este conjunto de cambios hace de PLAYLIST una herramienta que permite tratar imágenes astronómicas en tiempos relativamente cortos.

Palabras clave: Flat, Dark, PLAYLIST, Procesado, Lucky-imaging

LABURPENA

Behaketa astronomikoa hainbat erronka aurkezten dituen eremua da. Teleskopio guztietan gertatzen den arazoa osagai elektronikoen erabilerak eragindako akatsak dira. Detektagailuek, CMOs eta CCD-ek, tenperatura dela-eta eragina dute irudietan. Akats honek Dark izeneko prozesamenduaren beharra dauka, irudien zarata sortzen duen iluntasun korronteari erreferentzia eginez. Bestalde, lurreko teleskopioetan atmosferako turbulentiaren arazoa gehitzen da. Arazo haiek guztiek, irudien tratamendu teknikak eskatzen dizkie denak zuzendu ahal izateko. Proiektu honetan IDL hizkuntzan garatutako PLAYLIST ingurune barruan hobekuntzak egiten dira. Programa honen helburua irudi astronomikoak hobetzea da, horiek prozesatuz. Programaren automatizazioa ahalbidetzen duten banakako Dark eta Flat prozesamenduan hainbat hobekuntza garatu dira. Horretaz gain, funtzionalitate gehigarri batzuk gehitzeaz gain, beste zenbait alderdietan aldaketa txiki batzuk egin daitezke. Aldaketa multzo horri esker, PLAYLIST denbora nahiko laburrean irudi astronomikoak prozesatzeko aukera ematen duen tresna da.

Hitz gakoak: Flat, Dark, PLAYLIST, Prozesamendua, Lucky-imaging

ABSTRACT

Astronomical observation is a field that presents several challenges. A common problem in all telescopes is the defects induced by using electronic components. The detectors,

both CMOs and CCDs, influence the images due to their temperature, this defect requires a processing called dark processing in reference to the dark current that generates noise in the image. On the other hand, optical elements and filters deform the image, which requires another processing called flat. In addition, in terrestrial telescopes, the problem of atmospheric turbulence is added, which means that the images require processing techniques to correct the defects that it adds to them. In this project, improvements are made within the PLAYLIST environment developed in the IDL language. The aim of this program is to improve astronomical images by processing them. A series of improvements have been developed in the individual processing of darks and flats that allow the program to be automated. In addition, several other aspects have been tweaked and a few extra functionalities have been added. This set of changes makes PLAYLIST a tool that allows to process astronomical images in relatively short times.

Keywords: Flat, Dark, PLAYLIST, Indicted, Lucky-imaging

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANETCAM UPV/EHU	6
2.1 Detectores	8
2.2 Filtros	10
2.3 Problemática tratada en este trabajo	12
3. PLAYLIST	14
3.1 Funcionamiento general de PLAYLIST	14
3.2 Procesado antiguo de Darks y Flats en PLAYLIST	18
3.2.1 Procesado de Darks	19
3.2.2 Procesado de Flats	21
3.3 Procesado con PLAYLIST de imágenes	21
4. REDUCCIÓN ASTRONÓMICA AUTOMÁTICA EN PLAYLIST	23
4.1 Introducción	23
4.2 Procesado de los Darks	24
4.2.1 Búsqueda de archivos	26
4.2.2 Gestión de las cabeceras	26
4.2.3 Cálculo del Master Dark	27
4.2.4 Grabación del Master Dark con un nombre y cabecera interpretable por PLAYLIST	28
4.3 Procesado de los Flats	30
4.3.1 Substracción de Master Dark	31
4.4 Cambios adicionales en PLAYLIST	31
4.4.1 Tiempos de ejecución	31
4.4.2 Distintas cabeceras para SWIR y VIS	32
4.4.3 Visualización	33
4.4.4 Comprobación de observaciones ya procesadas mediante PLAYLIST ...	33
4.5 Resultados de imágenes de PlanetCam procesadas con la PLAYLIST actual (Canal SWIR)	34
5. CONCLUSIONES	40
6. REFERENCIAS	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efecto seeing.....	2
Figura 2: Ejemplo de Lucky Imaging con el núcleo del cúmulo estelar M15..	3
Figura 3: Diagrama de PlanetCam	7
Figura 4: Diagrama general de PlanetCam y fotografía	8
Figura 5: Transmitancia de los filtros del canal VIS y SWIR.....	11
Figura 6: Aspecto inicial de la interfaz gráfica del programa PLAYLIST.....	15
Figura 7: Aspecto de la interfaz gráfica del programa PLAYLIST durante el procesado de una imagen de Júpiter.	17
Figura 8: Ejemplo de proceso de guardado de PLAYLIST	18
Figura 9: Ejemplo de información accesible del header de un archivo Dark en el canal SWIR.....	20
Figura 10: Diagrama de flujo del programa <code>plist_calibration.pro</code>	24
Figura 11: Diagrama de flujo del procesado de archivos Darks.....	25
Figura 12: Sección del código que realiza parte del análisis de los cabeceros.	27
Figura 13: Interfaz gráfica del programa PLAYLIST durante el procesado de un archivo Dark.....	28
Figura 14: Creación de los nombres de los archivos Master Dark en función de las cámaras utilizadas.	29
Figura 15: Ejemplos de los archivos generados con nombres automáticos elegidos por el software.....	29
Figura 16: Código utilizado para la muestra de mensajes en PLAYLIST.	29
Figura 17: Diagrama de flujo del procesado de archivos Flats.....	30
Figura 18: Tiempo total necesario para procesar de manera automática.....	32
Figura 19: Ejemplos de los cambios realizados en la programación.....	33
Figura 20: Código utilizado para la comprobación de imágenes ya procesadas mediante PLAYLIST.....	34
Figura 21: Ejemplo de uso de PLAYLIST sobre imágenes de Saturno adquiridas el 8 de junio de 2021.....	36
Figura 22: Ejemplo de uso de PLAYLIST sobre imágenes de Neptuno adquiridas el 20 de julio de 2021.	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de los detectores de PlanetCam (Mendikoa et al., 2016).....	9
Tabla 2: Resolución espacial por pixel de cada modo óptico (Hueso et al., 2015)	10
Tabla 3: Descripción de los diferentes elementos encontrados en los nombres de los archivos generados mediante PLAYLIST.....	17
Tabla 4: Parámetros clave a analizar en las cabeceras.	20
Tabla 5: Parámetros clave a analizar en las cabeceras del programa "Build Calibration".	27

1. INTRODUCCIÓN

La observación astronómica es uno de los campos que presentan mayores desafíos en el campo de la formación de imágenes de calidad. La baja luminosidad de los objetos a observar y la alta resolución necesaria en astronomía requieren corregir los efectos introducidos por la lectura de los detectores y los efectos ópticos generados en el sistema. La observación desde la superficie terrestre implica desafíos adicionales, ya que la atmósfera introduce defectos variables en las imágenes como consecuencia de la turbulencia atmosférica. Los rayos de luz provenientes de una estrella lejana o de otros cuerpos celestes como planetas u objetos de espacio profundo inciden sobre un telescopio tras atravesar diferentes caminos en la atmósfera produciendo *speckles* que cambian en el tiempo y que son los responsables del “titilar” de las estrellas en su observación visual.

El seeing es un término fundamental utilizado en la astronomía que hace referencia a los efectos de la turbulencia atmosférica. Debido a estas turbulencias, parte de la luz que proviene de las estrellas se dispersa creando fluctuaciones en la amplitud y la fase de la longitud de onda. El grado de turbulencia de la atmósfera está relacionado directamente con las corrientes de aire de distinta densidad y temperatura que se encuentran en ella. De este modo, el aire debe atravesar medios con distinto índice de refracción, variando el camino óptico para cada uno de los rayos de luz, añadiendo así a las imágenes astronómicas un aspecto desenfocado o poco definido. Por esta razón, el valor del seeing es diferente según la altura a la que se encuentran los observatorios (Zago, 2021).

Por ejemplo, observatorios como La Palma (2400 m) o Mauna Kea (4205 m), situados a grandes altitudes, tienen un seeing de 0.4 segundos de arco. En cambio, observatorios situados a baja altitud tienen un seeing que supera el segundo de arco. Se puede inferir que la altura juega un papel esencial a la hora de mejorar el seeing del observatorio. Cuanto mayor sea la altura, menores serán las “capas” de diferentes densidades que tendrán que pasar los rayos provenientes de las estrellas, planetas, galaxias, etc. Esta es la principal razón de la inserción de telescopios en el espacio y sirve como indicativo de la importancia que toma la atmósfera en la astronomía. Su impacto llega hasta tal punto que se ve necesario el envío de telescopios espaciales, algunos de ellos como el Hubble, que estudian rangos del espectro electromagnético que también llegan a la superficie terrestre.

La figura 1 ilustra el camino óptico seguido por dos fuentes puntuales de luz que inciden sobre un mismo telescopio. Debido a que la luz de cada fuente atraviesa un camino

óptico diferentes, el frente de onda asociado a cada fuente de luz puede ser diferente y el “titileo” de estas dos fuentes puede ser diferente. El efecto del seeing atmosférico depende también del diámetros del telescopio y afectará en mayor medida a la observación con grandes telescopios que permiten que la luz que llega a sus espejos proceda de caminos ópticos más diferentes que la luz que alcanza telescopios de menor diámetro.

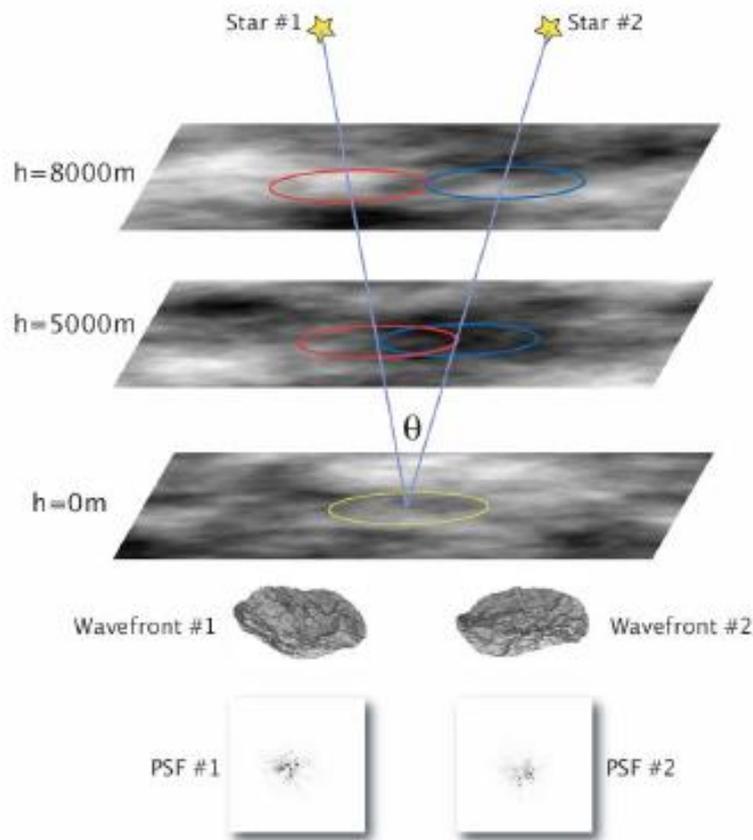


Figura 1: Efecto seeing atmosférico. Fuente: Apuntes de la asignatura Procesado de datos espaciales del Máster en Ciencia y Tecnología Espacial de la UPV/EHU (Figura original en (Hormuth, 2007)).

Durante las observaciones, el seeing distorsiona las imágenes mostrándolas menos nítidas y difíciles de enfocar. Por esta razón, el seeing afecta sobre todo a las observaciones realizadas de objetos continuos como los planetas ya que debido a la falta de nitidez de las imágenes se pierden detalles de estos.

Una posible técnica para corregir estos efectos atmosféricos es la técnica Lucky Imaging (Law et al., 2006). La técnica de Lucky Imaging se basa en la alineación y apilamiento de un gran número de imágenes con un tiempo de exposición corto (inferior a los tiempos con los que evoluciona la turbulencia atmosférica), dando un mayor peso a aquellas imágenes más enfocadas y menos afectadas por la turbulencia y que permitan una visualización más nítida del objetivo (de ahí el nombre de la técnica), ya que da más importancia a aquellas imágenes que hayan tenido la suerte de ser tomadas en el

momento preciso en el que las condiciones (sobre todo atmosféricas) eran las idóneas. Esta técnica funciona exitosamente a la hora de obtener imágenes de alta resolución en longitudes de onda del espectro visible y es una alternativa a la óptica adaptativa en longitudes de onda del infrarrojo cercano. Especialmente este caso es remarcable. Mientras que la óptica adaptativa está reservada para emplazamientos astronómicos de gran nivel debido a su alto costo, la técnica lucky imaging es puramente computacional, por lo que su coste es prácticamente nulo. Este es el principal motivo por el que su uso se ha extendido enormemente a telescopios de tamaño pequeño y mediano, especialmente en la comunidad astronómica amateur.

La figura 2 ilustra una aplicación clásica de la técnica de Lucky Imaging.

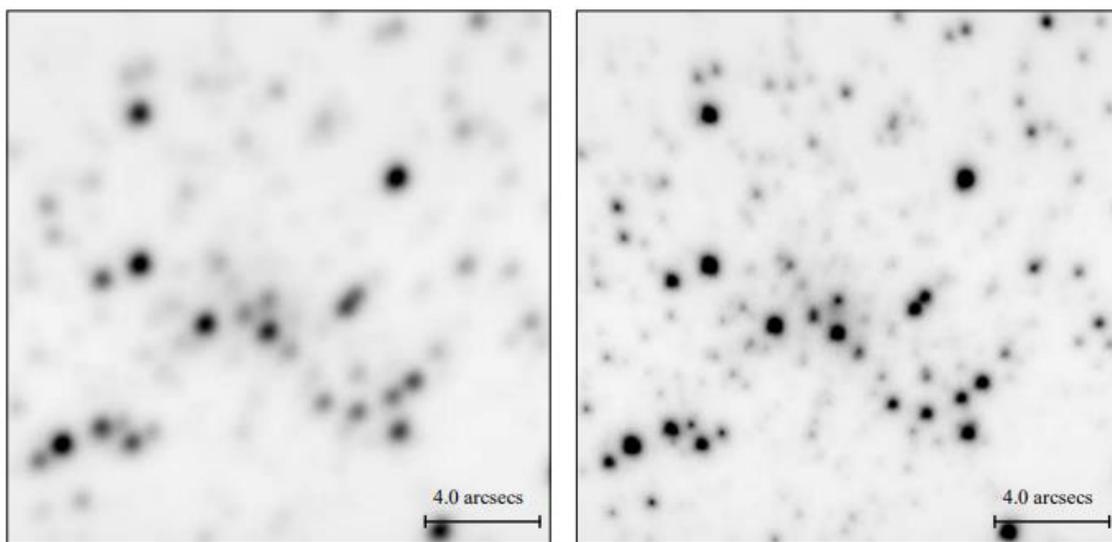


Figura 2: Ejemplo de Lucky Imaging con el núcleo del cúmulo estelar M15. A la izquierda se observa esta región del cielo en observación directa sin Lucky Imaging. A la derecha, se muestra la mejora de la imagen tras aplicar la técnica de Lucky Imaging con el 10% de las mejores imágenes (Law et al., 2006).

Aunque esta técnica se desarrolló en el ámbito de la astronomía profesional, su uso en objetos extensos como planetas es muy habitual en el mundo de la astronomía amateur, ya que la observación planetaria cuenta con objetos brillantes donde la técnica puede utilizarse incluso con telescopios de pequeño tamaño. En el caso de los objetos extensos como un planeta, la imagen obtenida por un telescopio presenta una figura cambiante que se desplaza y deforma continuamente debido a las turbulencias atmosféricas, pero que adquiere mejor calidad en momentos breves. La técnica Lucky Imaging es utilizada, entre otros, por el grupo de ciencias planetarias de la Universidad del País Vasco en un instrumento denominado PlanetCam UPV/EHU utilizado en los telescopios del observatorio de Calar Alto en Almería. Las características conceptuales de este instrumento y su implementación práctica están descritas por Sánchez-Lavega et al., 2012 y Mendikoa et al., 2016. Las observaciones originales son secuencias de videos de

alta velocidad que han de ser procesados por un software o *pipeline* específico denominado **PLAYLIST (PLANetary Y List Image STACKer)**.

En este proyecto se ha participado en el desarrollo de cambios en el programa PLAYLIST. Estos cambios afectan de manera directa a la fase de “reducción astronómica” de las imágenes. La fase de reducción astronómica es crucial para el posterior estudio de las imágenes, además de una de las más complejas. El resumen de la metodología seguida en el instrumento PlanetCam consiste, en primer lugar, en comparar las imágenes originales con los archivos de calibración que contienen la información acerca de detalles que deben ser mejorados en la imagen. Estos detalles son la respuesta electrónica de los sensores del detector del telescopio. Para diferentes tiempos de exposición este ruido electrónico será mayor o menor en relación directa con el propio tiempo, dado que, a más tiempo, más fotones capta el detector que generan lo que se conoce como corriente de oscuridad. Esto se trata mediante los archivos Dark como se explicará más adelante. Por otro lado, la propia arquitectura óptica del detector es imperfecta, por ello existen defectos de iluminación y en ocasiones de distorsión de la imagen que son introducidos al sistema por la propia óptica de este. Además, el sistema de filtros móviles que tiene PlanetCam, o la propia suciedad del telescopio (motas de polvo) también añaden defectos a la imagen que son tratados con otro tipo de archivos conocidos como archivos Flats.

El instrumento PlanetCam es una cámara dual con múltiples filtros y sistemas ópticos. Por ello como se ha mencionado anteriormente los archivos de calibración (Darks y Flats) pueden ser muy numerosos en función de la intensidad de la campaña de observación planeada. Este proyecto tiene como principal objetivo implementar un módulo dentro del programa PLAYLIST que sea capaz de resolver la problemática añadida por la fase de reducción astronómica. A modo de ejemplo, para cada imagen obtenida en una observación se le deben aplicar los archivos de calibración adecuados en función de diversos parámetros que serán explicados en futuros apartados. Por ello, el hecho de que esto sea una labor manual hace el trabajo de reducción de datos realmente arduo. El programa diseñado permite reducir en gran medida el tiempo que se tarda en esta tarea, resolviendo la problemática introducida por los archivos de calibración, generando de manera automática archivos de calibración finales llamados “*master files*” a partir de adquisiciones en video de Darks y Flats.

En esta memoria se expondrán los siguientes puntos necesarios para comprender en profundidad al instrumento PlanetCam y las labores de programación realizadas para la implementación del nuevo módulo dentro de la *pipeline* ya existente para el tratamiento de imágenes:

- En el capítulo 2 se explicará el sistema a utilizar: La cámara PlanetCam ubicada en Calar Alto, en Almería. Esta cámara está acoplada al telescopio de 2.2 m y consta de un sistema de filtros y detectores que será ampliamente explicado.

- El capítulo 3 trata de PLAYLIST, una *pipeline* diseñada para el tratado de imágenes de PlanetCam. Se pondrá en contexto la problemática actual y se expondrán algunas arquitecturas de procesado actuales.
- El cuarto capítulo, sin duda el más extenso e importante, muestra todo lo necesario sobre el nuevo software implementado para el automatizado del tratamiento de imágenes astronómicas, así como la interfaz gráfica del propio programa. Finalmente se exponen los resultados conseguidos con el nuevo método
- El capítulo de conclusiones muestra un breve resumen de lo conseguido hasta el momento, así como vistas a futuro sobre temas que pueden mejorar.

En cuanto a la ubicación general de este trabajo en el contexto del máster, se puede decir que la asignatura que cobra una mayor importancia es “Procesado de datos espaciales”. Si bien es cierto que toman ligera importancia otras asignaturas como “Detectores y sensores” para los detectores del sistema, “Física del sistema solar” por los cuerpos celestes estudiados, y “Atmósferas planetarias” en cuanto a la importancia de los filtros y su aplicación al estudio de las atmósferas, la asignatura de procesado toma un papel central en la elaboración de este trabajo.

2. PLANETCAM UPV/EHU

Esta sección proporciona un contexto general al Trabajo Fin de Máster desarrollado describiendo el instrumento PlanetCam UPV/EHU. Una descripción más extensa se puede encontrar en Mendikoa et al., 2016. La subsección 2.1 describe los detectores encargados de captar las imágenes de PlanetCam. En la subsección 2.2 se explica el sistema de filtros del que hace uso el sistema, el cual le permite obtener información a diferentes longitudes de onda específicas, lo cual es de gran ayuda en el estudio de las atmósferas planetarias, ámbito para el que está diseñado el instrumento. La subsección 2.3 describe la problemática particular que un instrumento como PlanetCam plantea en la reducción astronómica de sus imágenes. Este será el aspecto principal tratado en este proyecto.

PlanetCam UPV/EHU es una cámara astronómica diseñada en el Grupo de Ciencias Planetarias de la Universidad del País Vasco UPV/EHU para la obtención de imágenes de alta resolución de los planetas del sistema Solar mediante la técnica de Lucky Imaging.

PlanetCam es una cámara dual que utiliza un colimador cuya luz alcanza un dicroico que separa el haz de que llega del telescopio. El dicroico está diseñado para separar la luz en dos rangos de longitudes de onda que siguen caminos perpendiculares. El haz directo contiene luz del infrarrojo cercano de onda corta (Short-Wave InfraRed o SWIR, 1.0-1.7 μm) y el haz reflejado a 90° contiene luz en el rango visible (VIS, 0.38-1.0 μm). Cada haz atraviesa una rueda de filtros con filtros espectrales anchos y estrechos cuyas características ópticas están diseñadas para el estudio de las atmósferas planetarias. En cada rueda existen 20 posiciones disponibles, si bien la cámara solo está equipada con 11 filtros en el canal visible y 14 en el canal SWIR.

Cada uno de los canales tiene tres modos ópticos de ampliación de la imagen con respecto a la focal del telescopio, gracias a tres sistemas de lentes intercambiables a través de un movimiento horizontal motorizado. Cada modo óptico ofrece una resolución espacial diferente y permite ajustar la escala de la observación a las condiciones atmosféricas (menor ampliación y resolución espacial en condiciones de mal seeing atmosférico y máxima ampliación y resolución espacial en condiciones óptimas, o cuando se pretende estudiar objetos de pequeño tamaño angular como pueden ser los planetas Urano o Neptuno). La máxima ampliación requiere también tiempos de exposición mayores. Finalmente, la luz de cada haz llega a dos detectores adecuados para cada canal. La selección de cada modo óptico diferente requiere tener el detector en una posición determinada para mantener el sistema enfocado. Estas operaciones de cambio de escala visual y enfocado de cada canal se efectúan de manera

automática por el software de control, de manera que el usuario solo tiene que enfocar el telescopio sin tener que gestionar los diferentes enfoques asociados a cada uno de los tres posibles modos ópticos de cada una de las dos cámaras.

El instrumento se controla con dos ordenadores (uno para cada canal) con una interfaz gráfica de uso sencillo que gestiona las ruedas de filtros, ópticas, enfriamiento de cada detector y la adquisición de las imágenes.

La figura 3 muestra un esquema conceptual del instrumento y la figura 4 muestra una fotografía de PlanetCam instalado en el telescopio de 2.2m de diámetro del Observatorio de Calar Alto en Almería. Estas figuras representan la versión 2 del instrumento PlanetCam, versión operativa entre los años 2015-2021. Se espera una nueva versión del instrumento a partir de octubre de 2021 tras renovar los dos detectores ópticos por nuevas cámaras de mejores prestaciones.

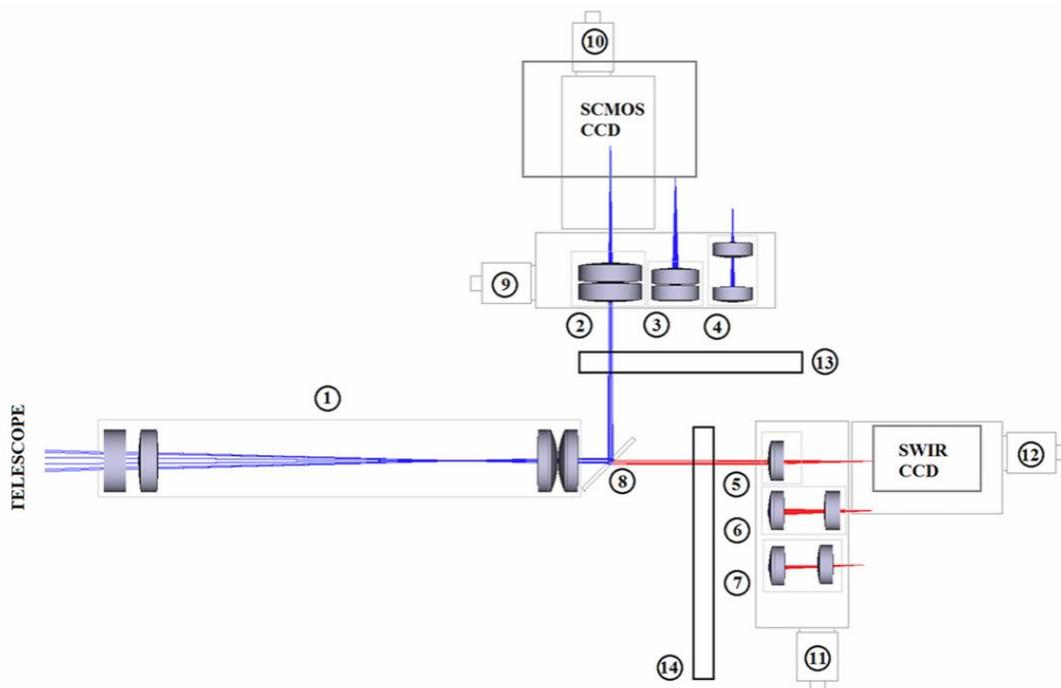


Figura 3: Diagrama de PlanetCam: 1- Colimador, 2-4- Ópticas de aumento para el canal VIS, 5-7- Ópticas de aumento para el canal SWIR, 8- Dicroico divisor de haz, 9- Etapa lineal motorizada para la selección de la óptica del canal VIS, 10- Etapa lineal motorizada para el enfoque del detector VIS, 11- Etapa lineal motorizada para la selección de la escala SWIR, 12- Etapa lineal motorizada para el enfoque del detector SWIR, 13- Rueda de filtros VIS, 14- Rueda de filtros SWIR (Mendikoa et al., 2016).

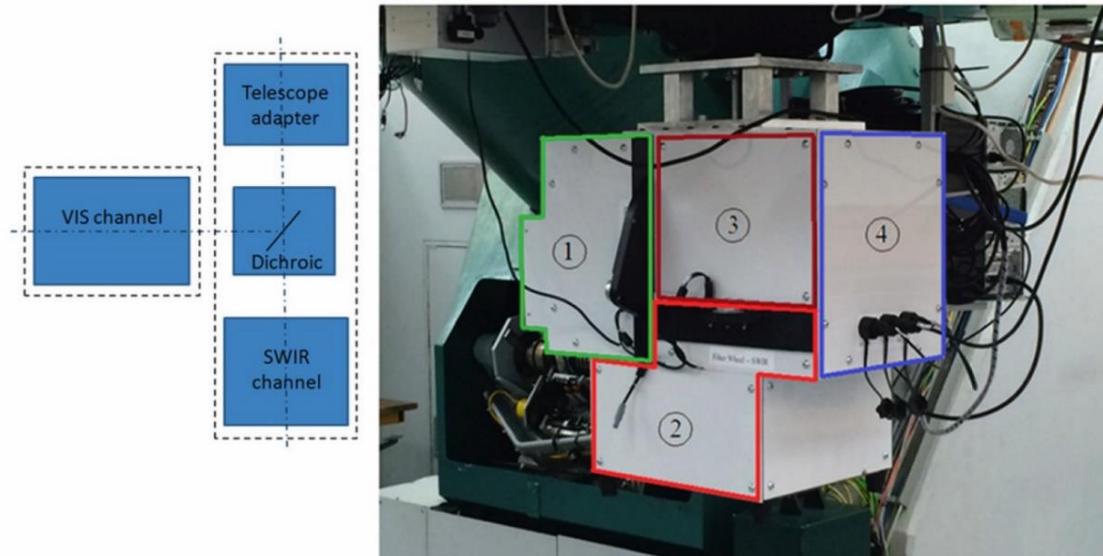


Figura 4: Diagrama general de PlanetCam (izquierda) y fotografía del instrumento acoplado al foco Cassegrain del telescopio de 1.2m del observatorio de Calar Alto (derecha): 1- Canal Visible, 2- Canal SWIR, 3- Colimador y dichroico y 4- Electrónica. Pueden apreciarse los dos PC de control del instrumento tras el bloque 4 (Mendikoa et al., 2016).

2.1 Detectores

El canal visible tiene un detector comercial Neo SCMOS de la compañía Andor con alta frecuencia de captura de imagen, gran tamaño, eficiencia cuántica espectral razonable y bajo nivel de ruido de lectura con refrigeración por un dispositivo Peltier hasta -25°C . La cámara tiene dos fases de multiplicación de ganancia que no permiten una variación lineal de la ganancia. La cámara permite diferentes modos de binning electrónico. El binning es la técnica que consiste en fusionar digitalmente píxeles del detector, para que actúen como un píxel de mayor tamaño capaz de conseguir más luz, aumentando así el rango dinámico del sistema, a coste de perder algo de resolución. A diferencia de los sistemas CCD tradicionales el modo "binning x2" permite un mayor rango dinámico de las imágenes en bruto ya que la conversión digital se realiza antes del binning de manera que el modo "binning x2" permite también mayor versatilidad en el uso de tiempos de exposición. En la práctica el modo más habitual de funcionamiento de este detector es utilizando la ampliación intermedia y "binning x2". Las exposiciones más cortas pueden ser extremadamente breves (0.01 segundo en observaciones de Júpiter en filtros anchos o hasta 100 veces más rápido en estrellas muy brillantes) o muy largas. La corriente de oscuridad empieza a ser limitante para tiempos de exposición superiores a los 60 segundos.

El canal SWIR utiliza un detector CCD de nombre comercial OWL SWIR 640 de la empresa Raptor Photonics también enfriado mediante un Peltier. Esta cámara tiene una ganancia lineal típica de la mayoría de los detectores CCD. Su enfriamiento máximo es teóricamente -15°C , pero en la práctica es más cercano a los -5°C . La mínima exposición

posible en esta cámara es de 0.085 segundos. Un factor limitante de las imágenes obtenidas por esta cámara es la fuerte corriente de oscuridad que satura al propio detector, incluso sin una fuente de luz para exposiciones de unos 4 segundos o más cortas si la temperatura del detector es elevada. El modo habitual de funcionamiento de esta cámara es en alta resolución y sin binning dado que para exploración planetaria es necesaria una gran resolución (que permita ver estructuras atmosféricas) y, al ser los planetas cuerpos brillantes (excepto los gigantes helados), la técnica de binning no se ve necesaria.

Los dos detectores están conectados a un canal metálico frío que actúa como conductor térmico. Este conductor está refrigerado por un *chiller* (cuyo funcionamiento es similar al de una máquina frigorífica) con un circuito de agua fría y ventilación por aire. El nivel de refrigeración es importante especialmente cuando se estudia el espectro infrarrojo, donde la temperatura del detector debe ser lo más baja que pueda ya que es en este rango donde se puede ver la emisión térmica, por lo que es especialmente sensible.

Las características de ambos detectores se detallan en la tabla 1. La tabla 2 muestra los FOV posibles con los tres modos ópticos y la resolución espacial por píxel cuando el instrumento está montado en el telescopio de 2.2m de Calar Alto.

Tabla 1: Características de los detectores de PlanetCam (Mendikoa et al., 2016).

<u>PlanetCam1</u>	
Eficiencia cuántica (550 nm)	57%
Área (píxel)	2560x2160 (6.5 μm cada uno)
Ruido de lectura (e^-s^{-1})	1.5
Velocidad de fotogramas completas (fps)	100
<u>PlanetCam2</u>	
Eficiencia cuántica (1.35 μm)	85%
Área (píxel)	640x512 (15 μm cada uno)
Ruido de lectura (e^-s^{-1})	< 50 (alta ganancia)
Velocidad de fotogramas completas (fps)	120
Tiempo de exposición (ms)	8.5 - 22000
Rango espectral (μm)	0.4 - 1.7

Tabla 2: Resolución espacial por pixel de cada modo óptico (Hueso et al., 2015).

Canal VIS				
Telescopio de 1,23 m de Calar Alto				
Amplificación	Focal Total (mm)	Escala ("/mm)	Escala ("/pixel)	FOV (")
1.18x	11631	17.7	0.115	144
2.10x	20700	9.96	0.08	144
2.65x	26121	7.90	0.05	128
Telescopio de 2,2 m de Calar Alto				
Amplificación	Focal Total (mm)	Escala ("/mm)	Escala ("/pixel)	FOV (")
1.18x	20781	9.93	0.065	108
2.10x	36983	5.58	0.036	72
2.65x	46669	4.42	0.028	72

Canal SWIR				
Telescopio de 1,23 m de Calar Alto				
Amplificación	Focal Total (mm)	Escala ("/mm)	Escala ("/pixel)	FOV (")
1.10x	10843	19.0	0.29	144
1.65x	16264	12.7	0.19	116
2.00x	19714	10.5	0.16	102
Telescopio de 2,2 m de Calar Alto				
Amplificación	Focal Total (mm)	Escala ("/mm)	Escala ("/pixel)	FOV (")
1.10x	19372	10.7	0.16	86
1.65x	29058	7.10	0.11	70
2.00x	35222	5.86	0.088	56

2.2 Filtros

Los filtros utilizados en la cámara tienen un diámetro de 1.25 pulgadas (3.175 cm) y han sido seleccionados en función de longitudes de onda concretas para el estudio de las atmósferas planetarias. Los filtros de banda ancha utilizados posibilitan una alta transmisión de fotones facilitando la utilización de la técnica Lucky Imaging y permitiendo observaciones de alta resolución. Los filtros estrechos espectralmente y situados en bandas de absorción atmosféricas (típicamente en bandas de metano) requieren exposiciones largas y no permiten un uso eficaz de la técnica Lucky Imaging, pero son esenciales para la caracterización de la estructura vertical de las atmósferas planetarias. Otros filtros como el filtro U del canal visible o el filtro 1650LP del canal SWIR producen imágenes muy oscuras por la baja eficiencia cuántica de los detectores

en el rango espectral de los filtros. La lista completa de filtros y sus características específicas se describen en Mendikoa et al. (2016) pero las curvas de transmisibilidad de los filtros se reproducen aquí en la figura 5.

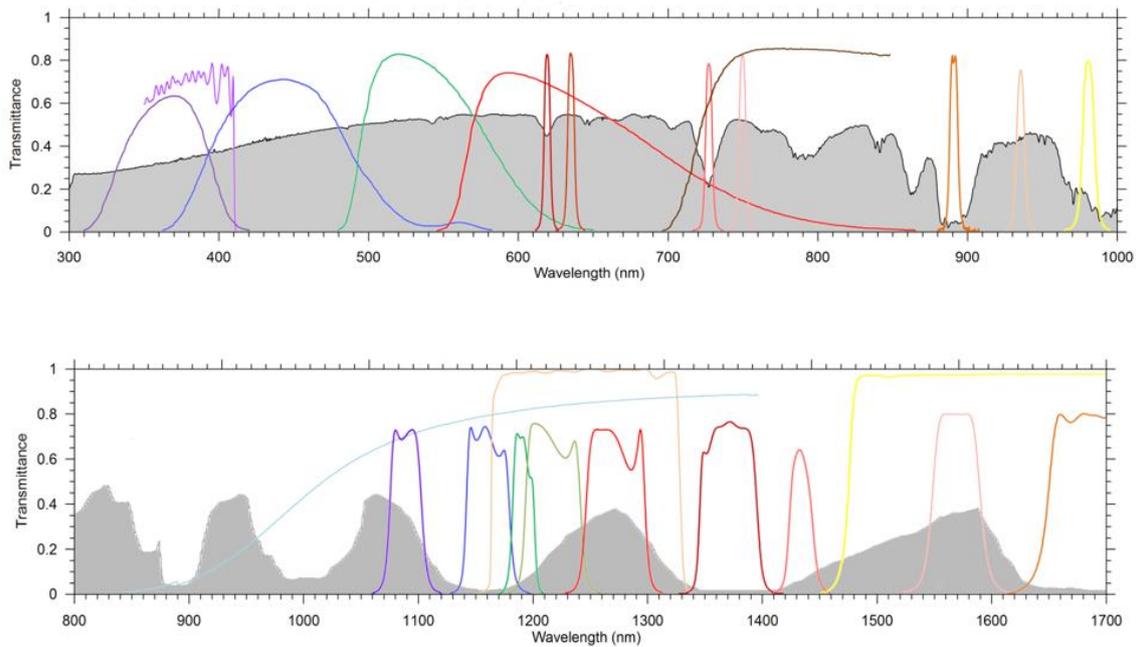


Figura 5: Transmitancia de los filtros del canal VIS y SWIR. La fila superior muestra los filtros del canal VIS. La fila inferior muestra los filtros del canal SWIR (Hueso et al., 2015).

La combinación de todos estos filtros permite a la cámara captar imágenes de alta resolución de la dinámica de las diferentes atmósferas de los planetas e imágenes de media resolución de las estructuras de las nubes. Por ejemplo, gracias a los filtros U, B e I se han podido caracterizar cambios globales de color en las atmósferas de Júpiter y Saturno (Mendikoa et al. 2017) y observar una gran variedad de fenómenos atmosféricos en Venus, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. PlanetCam permite también observaciones sin ningún filtro, por ejemplo, en el estudio de ocultaciones estelares que pueden realizarse a velocidades elevadas en el canal visible aumentando el factor de binning.

En definitiva, el instrumento PlanetCam es un instrumento altamente versátil orientado a la obtención de imágenes de muy alta resolución espacial de los planetas del Sistema Solar.

2.3 Problemática tratada en este trabajo

En una noche de observación típica pueden establecerse como objetivos múltiples planetas de brillo y tamaño muy diferente aconsejando observaciones con filtros estrechos si se quieren estudiar longitudes de onda en específico, como bandas de absorción o emisión del metano en Júpiter o Saturno, anchos si se desea estudiar la atmósfera en un rango determinado de longitudes de onda, lentos, rápidos y con parámetros ópticos distintos. Además, las condiciones de refrigeración de las cámaras pueden variar a lo largo de varias noches de observación afectando a aspectos importantes como el nivel del ruido de fondo. En una sesión de observación de PlanetCam se llega a conseguir una enorme variedad de tomas diferentes cuyas características en cuestión de tratado de imagen varían en función de muchos aspectos como los anteriormente mencionados. A modo de ejemplo, los archivos de calibración de la cámara en cuanto al ruido de fondo no son los mismos a lo largo de una noche, sino que dependen de la temperatura del detector en el momento de la toma de la imagen. Además de este, otras variables como la combinación de dos cámaras, los múltiples filtros aplicables, los diferentes tiempos de exposición, ópticas e incluso los modos de binning que se puede aplicar a las imágenes tomadas por la cámara visible tienen un impacto directo en la etapa de procesado de la imagen.

Cada tipo de observación requiere de archivos específicos para la reducción astronómica de las imágenes (archivos de Darks y Flats). Los archivos de Darks o “corriente de oscuridad” son archivos que representan el nivel de ruido del detector y dependen del detector, su temperatura, el factor de binning y el tiempo de exposición. En una imagen astronómica es necesario restar de la imagen obtenida cruda o *raw*, es decir, sin procesar, el Dark correspondiente que puede tener una amplia variación espacial, con píxeles con mayor nivel de ruido que otros distribuidos aleatoriamente por la imagen. Los archivos de Flat representan algunos de los defectos que introduce la óptica sobre las imágenes y se obtienen apuntando el telescopio sobre una pantalla homogénea o sobre el cielo al amanecer o atardecer. Las imágenes de Flat contienen información de la distribución de defectos en el detector (motas de polvo), viñeteos y efectos similares. Los Flats son únicos por cada cámara, óptica y filtro. En una imagen astronómica es necesario restar el Dark adecuado y dividir por el Flat adecuado para eliminar el efecto del ruido electrónico y anular los defectos en la imagen añadidos por la óptica.

En PlanetCam los archivos de Dark y Flat se obtienen como secuencias de vídeos y deben ser procesados para formar archivos de Dark y Flat de alta calidad necesarios para la reducción astronómica de las imágenes. Dada la amplia variedad de configuraciones posibles del equipo es necesario obtener un número elevado de archivos de Darks y Flats. Este procesado es puramente manual, es decir, la persona encargada del tratado de imagen debe elegir individualmente los Darks y Flats adecuados para cada una de las imágenes. Teniendo en cuenta que algunos parámetros pueden cambiar durante la misma exposición (como la temperatura de la cámara), y que todos ellos son necesarios

para que PLAYLIST pueda conseguir la imagen deseada sin defectos, esta tarea se convierte en algo realmente trabajoso y muy costoso en cuanto a tiempo.

En este trabajo se ha modificado PLAYLIST para abordar la generación de estos archivos de calibración automatizando completamente la tarea. De manera complementaria, también se han realizado algunas pequeñas mejoras en otros aspectos del programa que se mostrarán más adelante como, por ejemplo, en la visualización de resultados intermedios.

3. PLAYLIST

Para el proceso de reducción de imágenes astronómicas es común el uso de herramientas que permitan realizar las transformaciones correspondientes a los archivos obtenidos durante las observaciones. En la astronomía aficionada es muy común el uso de herramientas como PIPP para el tratado de los archivos y su formato, y otras como Registax o Astrosurface para el tratamiento y limpieza de las imágenes *per se*. En astronomía profesional es común el uso de herramientas propias que se ajusten a las necesidades del equipo investigador. Es común pues hablar de *pipelines*, un conjunto de programas relacionados entre sí y que precisan unos de otros para crear el entorno necesario para realizar la tarea para la cual ha sido diseñado dicho *pipeline*.

El *pipeline* de reducción de imágenes de PlanetCam se denomina **PLAYLIST (PLANetary Lucky Imaging STRacker)**. Es un programa desarrollado en el Grupo de Ciencias Planetarias de la UPV/EHU cuyo objetivo es procesar de manera automática y con una mínima intervención por parte del usuario grandes conjuntos de observaciones adquiridas bajo muy diferentes condiciones. El programa cuenta con una interfaz gráfica y ha sido desarrollado íntegramente en el lenguaje de programación IDL (Interactive Data Language).

IDL es un lenguaje de programación de alto nivel, intuitivo, interpretable e interactivo orientado al análisis y tratamiento de grandes cantidades de datos (incluyendo el procesamiento de imágenes). Está diseñado para operar con datos organizados en matrices y vectores al igual que MatLab y es un lenguaje muy popular en el ámbito de la astronomía y del *data análisis* en general.

En este proyecto se han modificado diferentes programas y funciones del software PLAYLIST para poder conseguir un sistema más rápido y eficiente. A continuación, se describe el funcionamiento del software como contexto general al desarrollo de este proyecto.

3.1 Funcionamiento general de PLAYLIST

El programa principal [playlist.pro](#) define la interfaz gráfica y llama a diferentes programas asociados inicialmente a los diferentes elementos gráficos de la interfaz. Estos elementos gráficos se denominan *widjets* y pueden ser desde una ventana de visualización hasta un botón interactivo o una ventana de texto. Como se observa en la figura 6, tras iniciar el programa todas las áreas gráficas y campos están vacíos.

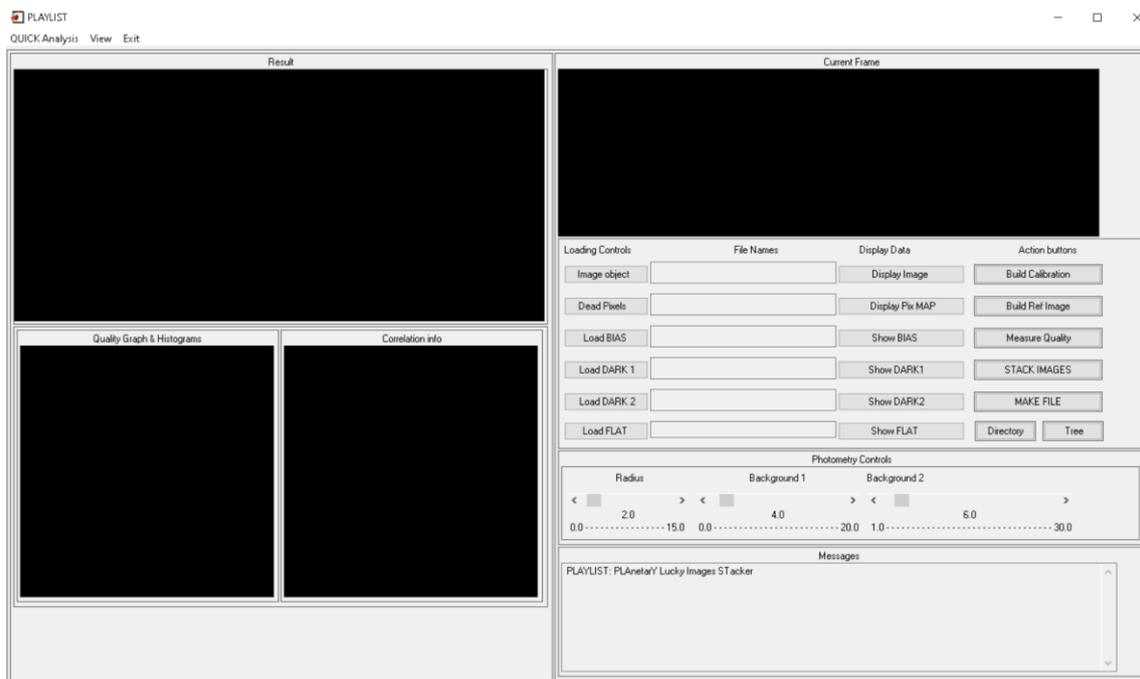


Figura 6: Aspecto inicial de la interfaz gráfica del programa PLAYLIST.

En el recuadro inferior derecho se pueden realizar diferentes acciones del programa pulsando los botones allí situados. Con el botón “MAKE FILE” PLAYLIST permite analizar un único archivo de tipo fits que contenga una observación en múltiples frames en el mismo archivo, o varios archivos fits secuenciales con nombres de archivo equivalentes con terminaciones X1.fits, X2.fits, X3.fits, etc. Estos archivos con estas terminaciones son generados por el software de adquisición en observaciones que tengan un número muy amplio de fotogramas que vaya más allá del tamaño máximo recomendado para archivos fits (2.0Gb). Mediante el botón “Directory” se puede especificar una carpeta completa en la que se encuentran las diferentes secuencias de imágenes que se quieren procesar. Una vez seleccionada una carpeta en específico, PLAYLIST se encarga de procesar sucesivamente las diferentes secuencias dentro de la carpeta indicada.

En ambos casos, una vez leída la cabecera del archivo fits a procesar (sea esta individual o una imagen dentro de una secuencia de un directorio dado) el software buscará y seleccionará de forma automática un directorio denominado “Calibration”. Este directorio contiene el archivo de corriente de oscuridad Dark y el archivo de Flat adecuado para dicha observación. El directorio “Calibration” actuará en paralelo al directorio que contiene la secuencia de imágenes procesadas. Esto quiere decir que, para la selección de los archivos de calibración, PLAYLIST analiza la información de texto disponible en los headers de las imágenes fits que se encuentran junto a los archivos fits en el directorio de la secuencia de imágenes. Estos archivos de Dark y Flat son los que serán utilizados para la reducción de las imágenes. Los archivos Dark y Flat se leen inicialmente, se almacenan en memoria y se aplican fotograma a fotograma en el

procesado de cada archivo fits, a cada uno un archivo de calibración en específico en función de lo indicado en el header de cada imagen.

Tras comenzar el proceso, en la ventana “*Current Frame*” (recuadro superior derecho) aparecen uno a uno todos los fotogramas de la serie. En la ventana “*Result*” (recuadro superior izquierdo) se muestra la versión sumada de las imágenes a medida que son analizadas.

PLAYLIST aplica el Dark y el Flat fotograma a fotograma, localizando automáticamente el objeto de interés mediante un algoritmo de evaluación del centro de brillo de la imagen. El programa analiza el nivel de calidad de cada imagen y representa los valores de calidad en forma de histograma, el cual es visible en la ventana de “*Quality Graph and Histograms*” (recuadro inferior izquierdo). Tras esto, se calcula una imagen de referencia con la cual se puede comparar cada uno de los fotogramas y así realizar un mapa de correlación. La imagen de referencia, el fotograma que se analiza en un instante dado, la diferencia entre ambos y el mapa de correlación serán visibles mediante la ventana de “*Correlation info*” (recuadro inferior central).

Mediante un algoritmo de correlación de imágenes se corregistran las imágenes con respecto a la referencia creada inicialmente. El algoritmo de correlación sirve para comparar dos imágenes. En este caso al comparar el fotograma con la imagen de referencia, se obtienen valores menores en aquellos lugares donde haya una mayor diferencia entre ambas imágenes debido a que el fotograma haya mejorado significativamente por la aplicación del procesado.

Durante el proceso, en la ventana “*Messages*” (recuadro inferior derecho) se muestran mensajes a medida que el programa realiza las acciones. Estos mensajes son: nombre del archivo, número de extensiones, información necesaria obtenida del *header*, información de cada fotograma y de la imagen de referencia, tiempo necesario para cada acción (nivel de calidad, alineamiento...), tiempo total transcurrido en el procesamiento de la imagen y directorio en el cual se guardará el resultado. En la figura 7 se muestran estos elementos gráficos para un caso real con una imagen de Júpiter. Se puede ver la imagen de Júpiter resultado de la suma de todos los procesados a fotogramas independientes, así como información en la ventana “*Messages*”, o el estudio de la diferencia entre imágenes junto con el mapa de correlación (donde rojo implica una mayor diferencia y azul menor entre las dos imágenes a analizar) en la ventana “*Correlation info*”.

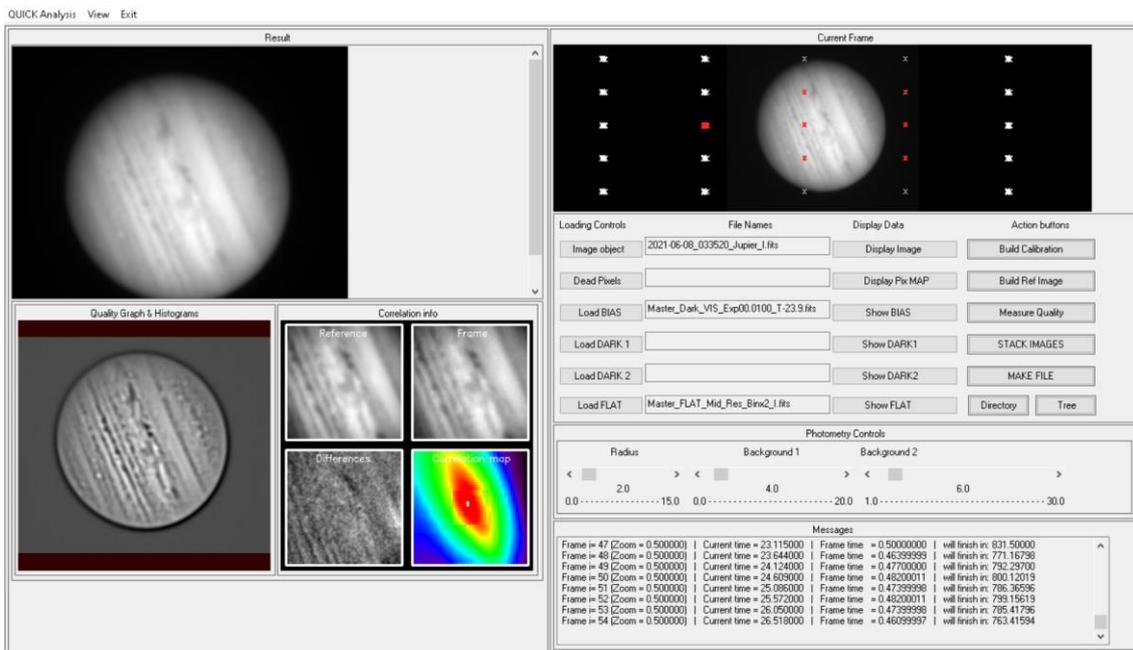


Figura 7: Aspecto de la interfaz gráfica del programa PLAYLIST durante el procesado de una imagen de Júpiter.

Tras finalizar con el procesado, PLAYLIST genera algunos archivos FITS en los cuales se guarda la imagen final con diferentes niveles de calidad en función de la selección de un porcentaje de los mejores fotogramas disponibles: 1 %, 2 %, 5 %, 10 % y 30%, además de todos los fotogramas de la serie de imágenes.

Estos resultados se guardan con nombres de archivos indicativos tal y como se resume en la figura 8 y en la tabla 3.

Tabla 3: Descripción de los diferentes elementos encontrados en los nombres de los archivos generados mediante PLAYLIST.

All	Suma de todas los fotogramas
BST01	Suma del 1% con mejor calidad
BST02	Suma del 2% con mejor calidad
BST05	Suma del 5% con mejor calidad
BST10	Suma del 10% con mejor calidad
BST30	Suma del 30% con mejor calidad
Final	Combinación lineal de las mejores imágenes
Stacked	Apilamiento de todas las imágenes

2020-11-01_220140_04_Neptune_B_All.jpg	Archivo JPG	Imagen sin procesar (jpg)
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST01.jpg	Archivo JPG	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST02.jpg	Archivo JPG	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST05.jpg	Archivo JPG	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST10.jpg	Archivo JPG	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST30.jpg	Archivo JPG	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_Final.jpg	Archivo JPG	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_Stacked.jpg	Archivo JPG	Imagen procesada (jpg)
P2020-11-01_220140_04_Neptune_B_All.jpg	Archivo JPG	
P2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST01.jpg	Archivo JPG	
P2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST02.jpg	Archivo JPG	
P2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST05.jpg	Archivo JPG	
P2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST10.jpg	Archivo JPG	
P2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST30.jpg	Archivo JPG	
P2020-11-01_220140_04_Neptune_B_Final.jpg	Archivo JPG	Imagen sin procesar (fits)
P2020-11-01_220140_04_Neptune_B_Stacked.jpg	Archivo JPG	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_ALL.fits	FITS Image File	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST01.fits	FITS Image File	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST02.fits	FITS Image File	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST05.fits	FITS Image File	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST10.fits	FITS Image File	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST30.fits	FITS Image File	
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_FINAL.fits	FITS Image File	Imagen procesada (fits)
2020-11-01_220140_04_Neptune_B_Stacked.fits	FITS Image File	
PHOTOMET2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST01.fits	FITS Image File	
PHOTOMET2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST10.fits	FITS Image File	
PHOTOMET2020-11-01_220140_04_Neptune_B_BST30.fits	FITS Image File	
PHOTOMET2020-11-01_220140_04_Neptune_B_FINAL.fits	FITS Image File	
PHOTOMET2020-11-01_220140_04_Neptune_B_STACK.fits	FITS Image File	

Figura 8: Ejemplo de proceso de guardado de PLAYLIST

3.2 Procesado antiguo de Darks y Flats en PLAYLIST

Los Darks y Flats utilizados por PLAYLIST son archivos denominados MASTER_DARKS y MASTER_FLATS. Estos se obtienen como resultado de procesar archivos de Darks y Flats obtenidos también mediante una secuencia de imágenes. La versión tradicional de PLAYLIST utiliza dos programas específicos para leer los archivos Darks y fits iniciales y transformarlos en los archivos MASTER_DARK y MASTER_FLATS. Como el conjunto de todos los archivos de Darks y Flats necesarios para un conjunto de observaciones puede ser muy amplio, el conjunto de archivos MASTER_DARK y MASTER_FLAT puede ser también muy amplio.

Los programas que PLAYLIST utiliza para transformar estos archivos iniciales de reducción en sus versiones MASTER son los programas [playlist_load_Dark1.pro](#), [playlist_load_Dark2.pro](#) (estos dos programas permites interpolar entre dos Darks con tiempos de exposición cercanos; sin embargo, esa complicación adicional no se ha tenido en cuenta en este proyecto) y [playlist_load_Flat.pro](#).

Estos programas permiten cargar archivos Dark y Flats generados por las cámaras como secuencias de imágenes y generar archivos MASTER_DARK y MASTER_FLAT para cada una de las configuraciones diferentes de las observaciones. Los MASTER_DARK y

MASTER_FLAT son archivos individuales con una única capa resultado de la suma y promedio de los diferentes fotogramas disponibles en cada Dark y Flat. En el procesado del Master Flat es necesario indicar un archivo Master Dark apropiado para la substracción de la corriente de oscuridad, ya que el archivo Master Flat debe contener únicamente el defecto inducido por la óptica y otros sistemas. Por ello es necesario eliminar de dicho archivo el efecto de la corriente de oscuridad, que ya estará incluido en el Dark.

3.2.1 Procesado de Darks

El programa [playlist_load_Dark1.pro](#) se activa a través del botón Load Dark 1 de la interfaz de PLAYLIST que se puede ver en las figuras 6 y 7. Cuando se pulsa dicho botón, el usuario puede seleccionar un archivo fits que contenga una secuencia de Darks como diferentes capas o *slices* del propio archivo. Este archivo será transformado en un master Dark con una única capa consiguiendo así el Master Dark correspondiente. El programa permite analizar también archivos fits comprimidos con el formato zip. El archivo master Darks generado permanece en memoria en PLAYLIST para procesados interactivos de imágenes, aunque esta es una acción que raramente se realiza.

Para el tratamiento de imágenes y la creación del master Dark, el programa [playlist_load_Dark1.pro](#) realiza una serie de acciones. En primer lugar, el programa busca e identifica los parámetros relevantes del header del archivo para generar un Master Dark con etiquetas correctas en su header. Además, para generar el Dark maestro realiza un promediado de la información disponible en las múltiples capas del archivo original, es decir, el conjunto de Darks individuales. Así, el programa es capaz de generar un archivo con un mayor rango dinámico y que muestra una corriente de oscuridad más correcta estadísticamente, al tener en cuenta muchos frames individuales es capaz de eliminar las fluctuaciones aleatorias que podía haber entre ellos, aportando un valor medio de la corriente de oscuridad más exacto que el que daban las imágenes individuales.

El programa ha de ser capaz también de funcionar correctamente con las imágenes del canal VIS y el canal SWIR, que pueden ser muy diferentes. Como ejemplo de ello están los headers de ambos, que contienen campos muy diferentes. Mientras que el detector del canal VIS puede realizar binning, el del SWIR no, por lo que el header del VIS incluye el apartado binning mientras que el del SWIR no. Por otro lado, existen diferentes formas en las que se expresan las ganancias en cada cámara.

Para la generación del master Dark se necesitan de cada header una serie de parámetros clave. Estos parámetros a identificar y preservar en el archivo master Dark final se especifican en la tabla 4. Un ejemplo de la cabecera (header) de un archivo Dark del detector SWIR se muestra en la figura 9.

Tabla 4: Parámetros clave a analizar en las cabeceras.

PARÁMETROS COMUNES	
DATE-OBS	EXPOSURE
BSCALE	HEAD
BZERO	
PARÁMETROS DE SWIR	
CCDTEMP	GAIN
OPTICS	FILTER
PARÁMETROS VIS	
GAIN1	GAIN2
SHUTTER	TEMP
READFREQ	ENCODING
FILTER1	FILTER2

```

[Image #1
SIMPLE = T / file does conform to FITS standard
BITPIX = 16 / number of bits per data pixel
NAXIS = 3 / number of data axes
NAXIS1 = 640 / length of data axis 1
NAXIS2 = 512 / length of data axis 2
NAXIS3 = 200 / length of data axis 3
EXTEND = T / FITS dataset may contain extensions
COMMENT FITS (Flexible Image Transport System) format is defined in 'Astronomy
COMMENT and Astrophysics', volume 376, page 359; bibcode: 2001A&A...376..359H
BZERO = 32768 / offset data range to that of unsigned short
BSCALE = 1 / default scaling factor
DATE-OBS= '2020-11-01T04:57:29. 4' / Date and time of observation (UTC)
NUMKIN = '200 ' / default scaling factor
EXPOSURE= '0.0700 ' / [sec] Exposure time
FPS = '12.5 ' / [fps] Frame Rate
HEAD = 'Raptor Owl 640' / Camera Model
CCDTEMP = '-6.8 ' / CCD temperature
GAIN = '260.0 ' / CCD digital gain
GAIN2 = 'High ' / CCD analog gain
NUC = 'Offset+Gain+Dark' / NUC mode
INSTRUME= 'PlanetCam' / Instrument ID
FILTER = 'RG1000 ' / FILTER
ST = '07:34:57' / Sidereal Time
UT = '04:57:29. 4' / Universal Time
EXPSTART= '04:57:13. 4' / Universal Time at the beginning of data
EXPEND = '04:57:29. 4' / Universal Time at the end of data
DATE = '2020-11-01' / YYYY-MM-DD
OPTICS = 'High Res' / Optics resolution
OBJECT = 'DARK_G260_T00.070_' / Object name
VERSION = 'PlanetCam SWIR ver 2.0' / Software version
XBINNING= '1 ' / Binning factor used on X axis
YBINNING= '1 ' / Binning factor used on X axis
RA_TARG = '07:35:01' / RA of the target in arcsecs
DEC_TARG= '37:13:47' / DEC of the target in arcsecs
AIRMASS = '1.0000 ' / AM of the target
FOCUS = '26.340 ' / Telescope focus
TEMP = '8.6 ' / Air temperature in C
HIERARCH TEMP_RING = '10.1 ' / Telescope structure temperature in C
  
```

Figura 9: Ejemplo de información accesible del header de un archivo Dark en el canal SWIR.

Por último, se guarda la información de los Darks en el header del Master Dark y se le pregunta al usuario mediante PLAYLIST el directorio y el nombre con el que se desea guardar el archivo generado.

3.2.2 Procesado de Flats

A través del botón Load Flat de PLAYLIST se activa el programa [playlist_load_Flat.pro](#). El funcionamiento de este programa es igual al del [playlist_load_Dark1.pro](#) con la diferencia de que en este caso es preciso abstraer de los Flat el Dark correspondiente. La razón de necesitar eliminar la corriente de oscuridad es la siguiente: En primer lugar, a la imagen se le resta el archivo Dark. Ambas imágenes contienen la deformación y defectos introducidos por los elementos ópticos, por lo que son equivalentes y se pueden restar. Así se obtiene una imagen sin corriente de oscuridad. El siguiente paso es dividir por el Flat. Si se dividiese por el Flat sin haber eliminado el efecto de la corriente, en la imagen final procesada volverían a aparecer defectos provocados por la misma corriente. Por ello es necesario quitar el Dark al Flat, pero no es necesario quitar el Flat al Dark.

Antes de la realización de este proyecto el usuario debía seleccionar el Dark o master Dark adecuado para cada Flat. Es decir, debía encontrar el archivo fits con los mismos valores de ganancia, exposición, temperatura del detector y factor de binning.

Una vez seleccionado el Master Dark adecuado, el Master Flat se genera substrayendo a cada fotograma del video Flat el Master Dark, sumando los fotogramas obtenidos generando una imagen de alto rango dinámico, y escalándola, dividiendo por su valor medio para que el valor medio del Master Flat generado sea exactamente 1, es decir, normalizándola. El Master Flat generado es una imagen en formato fits con una cabecera que debe contener los valores de las palabras claves que definen el Flat entre los cuales son fundamentales el filtro y la óptica.

3.3 Procesado con PLAYLIST de imágenes

PLAYLIST, a través de sus programas [plist_make_directory](#) y [plist_make_file](#) procesa las observaciones de ciencia buscando para cada archivo y de manera automática los archivos Master Dark y Master Flat adecuados para cada exposición. Para ello lee una lista de archivos y sus cabeceras. Sin embargo, el procesado inicial manual o interactivo de los Darks y Flats requiere de acciones del usuario por cada archivo de calibración. La variedad de filtros en ambas cámaras hace que las exposiciones típicas de una sesión de observación se realicen con muy diferentes exposiciones. En sesiones de observación largas en las que se haya observado con varios modos ópticos, diferentes ganancias y diferentes temperaturas, el número de archivos de calibración puede ser extraordinariamente grande y superar el centenar de archivos Darks con algunas decenas de archivos de Flats. Por todo ello, el procesado manual disponible hasta el

comienzo de este Trabajo Fin de Máster requiere de un trabajo pesado por el usuario que puede extenderse durante varias horas o incluso días completos.

En este proyecto se ha buscado realizar una herramienta informática disponible en PLAYLIST para la transformación automática de los archivos Darks y Flats originales en archivos MASTER_DARK y MASTER_FLAT que puedan ser utilizados por PLAYLIST de manera automática. Para ello se ha modificado por completo el programa [plist_calibration.pro](#) permitiendo alcanzar así los objetivos de este proyecto: Generar un programa que, a partir de una amplia lista de archivos de Darks y Flats, genera toda la secuencia de archivos de MASTER_DARK y MASTER_FLAT en el formato adecuado para su uso posterior de manera autónoma por el software, sin necesidad de acciones por parte del usuario más allá de iniciar el proceso.

4. REDUCCIÓN ASTRONÓMICA AUTOMÁTICA EN PLAYLIST

4.1 Introducción

Una vez expuesta la problemática anterior, la estrategia que se ha seguido ha sido incorporar todas las funciones que antes precisaban de un trabajo largo repetitivo por parte del usuario, en un único programa el cual el usuario solo deba ejecutar una vez. Este programa es [plist_calibration.pro](#) y está accesible en la interfaz gráfica de PLAYLIST en el botón **Build Calibration**.

Este programa consta de unas 670 líneas de código. Además de las tareas específicas de la creación de master Darks y master Flats se encarga de las tareas de comunicación con el resto de los programas que componen la *pipeline* de PLAYLIST y su interfaz de manera que es capaz de generar resultados parciales en las diferentes ventanas de visualización y de mensajes, tal y como se detalla más adelante. El programa se ejecuta una única vez para generar los archivos de reducción astronómica asociados a una serie de observaciones.

Para iniciar con el programa PLAYLIST, es necesario compilar y ejecutar el programa principal [playlist.pro](#). De esta manera, aparece en la pantalla la interfaz gráfica de usuario PLAYLIST tal y como aparecía en la figura 6, ya explicada en el capítulo anterior. En la zona central del lado derecho, mediante los botones virtuales están disponibles las diferentes funciones que el programa es capaz de realizar.

Mediante el botón **Build Calibration** se inicia el subprograma llamado [plist_calibration.pro](#). La figura 10 muestra un diagrama de flujo del funcionamiento del subprograma. Tras pulsar el botón, la interfaz requiere que el usuario indique el directorio en el cual se encuentran los archivos a procesar. De esta manera, el programa analiza el directo buscando todos los archivos Dark y Flat que se encuentren allí para proceder con el análisis de estos. Si no se elige ningún directorio, en la ventana de “Messages” se muestra un mensaje de aviso indicando que ninguna carpeta ha sido seleccionada.

El programa [plist_calibration.pro](#) procesa inicialmente los archivos Darks disponibles creando archivos Master Darks tal y como se explica en el capítulo anterior. Posteriormente analiza los archivos Flats creando los archivos Master Flats del mismo modo.

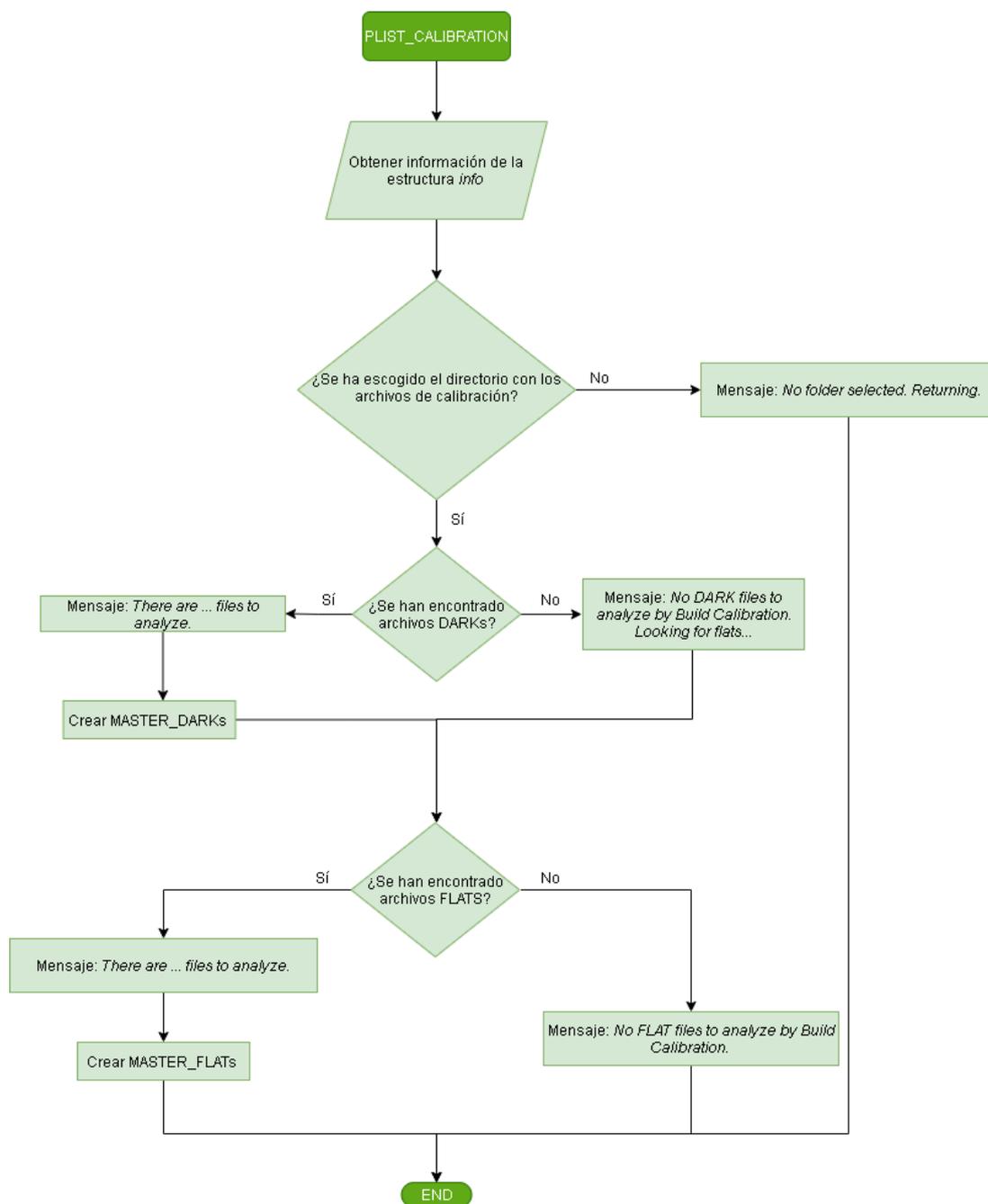


Figura 10: Diagrama de flujo del programa `plist_calibration.pro`.

4.2 Procesado de los Darks

El objetivo principal de este bloque del programa es la transformación de archivos fits que contienen secuencias de Darks con diferentes capas en archivos Master Darks con una sola capa. Este objetivo es el mismo que el del programa `playlist_load_Dark1.pro`, explicado en el anterior capítulo. Sin embargo, aquí se pretende que el programa actúe de manera totalmente autónoma sobre carpetas de archivos que pueden contener estructuras de directorios anidados. Para el desarrollo de este módulo del programa se ha reutilizado parte del código presente en el programa

[playlist_load_Dark1.pro](#) y se ha modificado para que funcione con más de un archivo a la vez, generando de manera automática nombres de archivos adecuados. El siguiente diagrama de flujo muestra un resumen de los pasos necesarios para el procesamiento de los Darks.

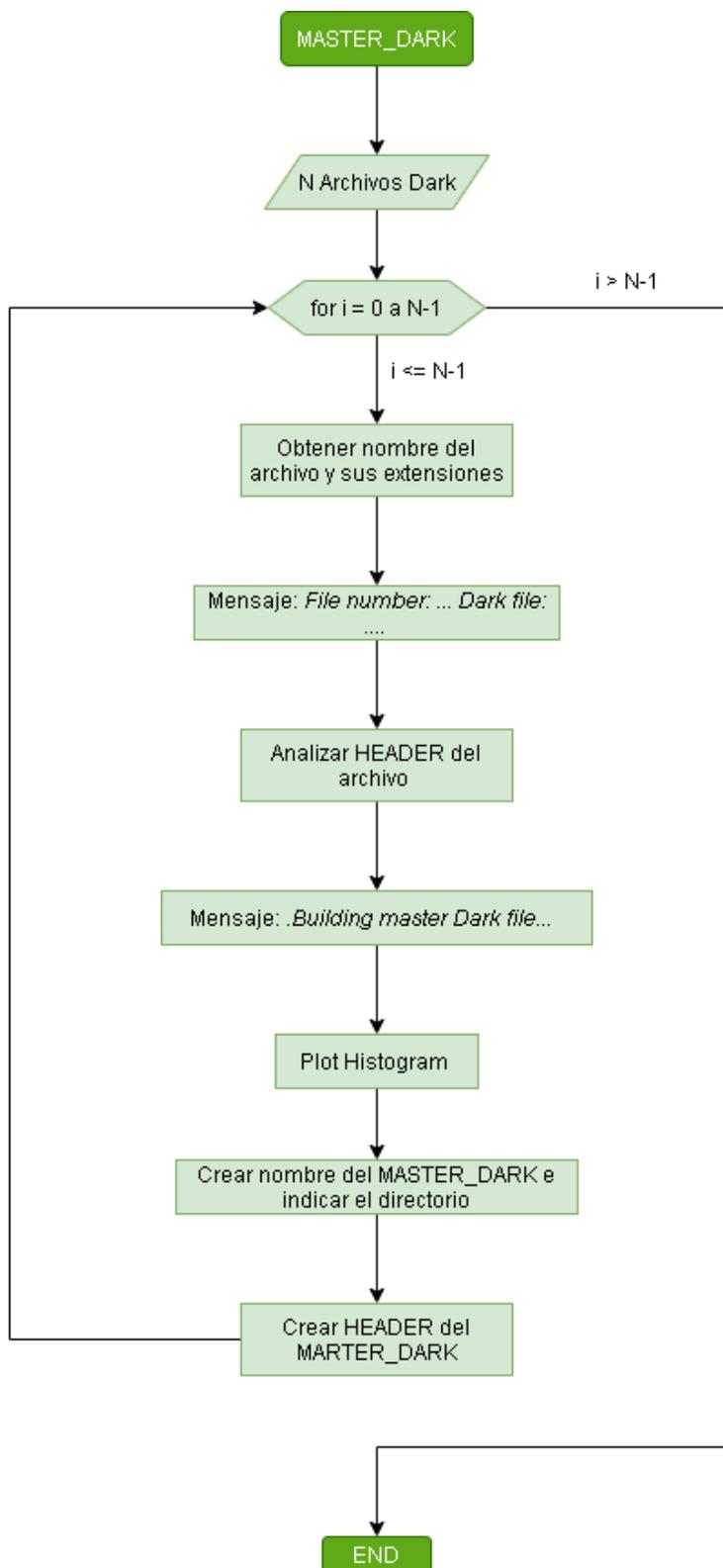


Figura 11: Diagrama de flujo del procesado de archivos Darks.

4.2.1 Búsqueda de archivos

Tras la selección de la carpeta, el programa busca en ella todos los archivos Dark que pueda haber. Para ello, lee los nombres de los archivos en busca de la palabra “Dark” filtrando todos los archivos con la palabra “Master”. Además, el programa está diseñado para que también busque dentro de las posibles carpetas que se encuentran en el directorio seleccionado para que de este modo pueda acceder a los distintos fotogramas que componen cada uno de los archivos.

A medida que el programa vaya encontrando los archivos Dark, este irá guardándolos en una variable llamada “Lista”. Si esta variable estuviera vacía, el programa indicaría en la ventana de PLAYLIST “Messages” la alerta de que ningún archivo Dark ha sido encontrado en el directorio seleccionado. En este caso el programa saltaría hasta el procesamiento de los Flats (el cual se explica más adelante). En caso contrario, en el mensaje se indicaría la cantidad de archivos encontrados.

Tras esto, se empiezan a analizar los archivos Dark de uno en uno. Primero de todo, se examina el nombre del archivo para identificar el tipo de extensión que tiene (fits o fts) o si está comprimido (en cuyo caso tendrá una extensión zip) o no.

Después de comprobar la cantidad de archivos Dark que se encuentran en el directorio, mediante un mensaje se le indica al usuario el número de archivos que está analizando y que están contenidos en la carpeta especificada, así como información sobre el nombre de dicha carpeta.

4.2.2 Gestión de las cabeceras

Es muy importante obtener la información adecuada de cada uno de los archivos Dark que se analiza en el programa. Así pues, se realiza el análisis de las cabeceras de estos para encontrar los parámetros necesarios que posteriormente serán utilizados en la creación de los Master Darks.

Como se ha explicado en el capítulo anterior, estos parámetros varían en función de la cámara que se haya utilizado. En este programa los parámetros que se van a analizar son menos que los estudiados en el programa [playlist_load_Dark1.pro](#), y se reducen a unos parámetros claves dados en la tabla 5. La figura 12 muestra un ejemplo de la sintaxis específica de IDL utilizada para acceder a dichos parámetros mediante la utilidad de IDL SXPART (programa adherido a IDL capaz de leer los headers de archivos fits) y los comandos de gestión de cadenas de caracteres STRING (capaz de cambiar la información al formato STRING) y STRCOMPRESS (comando encargado de eliminar los espacios en blanco que pueda haber en una variable de tipo STRING).

Tabla 5: Parámetros clave a analizar en las cabeceras del programa "Build Calibration".

PARÁMETROS COMUNES	
DATE-OBS	EXPOSURE
HEAD	XBINNING
YBINNING	
PARÁMETROS DE SWIR	
CCDTEMP	GAIN
OPTICS	
PARÁMETROS VIS	
GAIN1	GAIN2
TEMP	

```

; -----
; Analyzing header
; -----
DATE_OBS = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'DATE-OBS')), /REMOVE_ALL)
EXPOSURE = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'EXPOSURE')), /REMOVE_ALL)
HEAD      = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'HEAD')), /REMOVE_ALL)
XBINNING = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'XBINNING')), /REMOVE_ALL)
YBINNING = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'YBINNING')), /REMOVE_ALL)
; These are keywords ONLY defined in the SWIR Channel in PlanetCam
CCDTEMP  = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'CCDTEMP')), /REMOVE_ALL)
GAIN     = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'GAIN')), /REMOVE_ALL)
OPTICS   = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'OPTICS')), /REMOVE_ALL)
; -----
; These are keywords ONLY defined in the VIS Channel in PlanetCam
GAIN1    = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'GAIN1')), /REMOVE_ALL)
GAIN2    = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'GAIN2')), /REMOVE_ALL)
TEMP     = STRCOMPRESS (STRING (sxpars (Header, 'TEMP')), /REMOVE_ALL)

```

Figura 12: Sección del código que realiza parte del análisis de los cabeceros.

4.2.3 Cálculo del Master Dark

El primer paso en la creación de los Master Darks es conocer la cantidad de capas o imágenes que hay dentro de cada archivo Dark. Este valor es utilizado más adelante para obtener una sola capa o imagen final promedio en el archivo final Master Dark.

A medida que se van analizando cada una de las capas dentro del archivo, se van sumando todas ellas. En la ventana "Result" de la interfaz gráfica PLAYLIST se puede ir visualizando la creación del archivo Master Dark a medida que se van sumando las capas, mientras que en la ventana "Current Frame" aparece cada una de las capas que se están analizando. Se muestra un ejemplo del funcionamiento de PLAYLIST de esta fase en la figura 13.

Por último, en la ventana “Quality Graph and Histograms” se van mostrando los histogramas de las capas que se están analizando, pero se muestran únicamente los histogramas de cada 10 fotogramas (de esta manera se simplifica el bucle y se consigue que el programa funcione más rápido, además de permitir al usuario visualizar los fotogramas con más tiempo, dado que la aparición de todos podría resultar en algo más complejo de analizar).

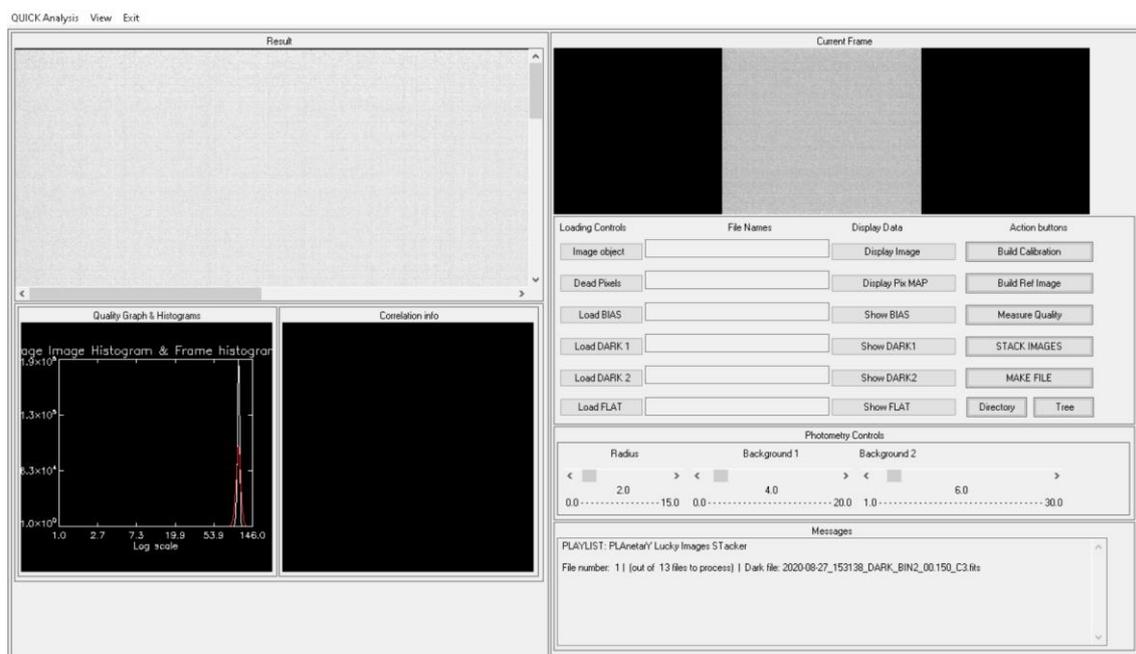


Figura 13: Interfaz gráfica del programa PLAYLIST durante el procesado de un archivo Dark.

Tras la suma de todas las capas dentro del archivo, se divide este valor entre la cantidad de fotogramas que se han analizado. Como se ha mencionado, de esta manera se obtiene una sola capa en el archivo final y se mejora estadísticamente el valor de la corriente de oscuridad.

4.2.4 Grabación del Master Dark con un nombre y cabecera interpretable por PLAYLIST

La creación de un nombre específico es fundamental para identificar de una manera fácil y sencilla los valores más importantes del archivo. Para la creación automática del nombre del archivo MASTER_DARK se utilizan los parámetros anteriormente obtenidos de las cabeceras. Ya que las diferentes cámaras tienen cabeceras diferentes también van a tener nombres diferentes. En el canal VIS se van a utilizar los parámetros HEAD, CCDTEMP Y EXPOSURE mientras que en el canal SWIR se van a utilizar HEAD, GAIN, CCDTEMP Y EXPOSURE.

- HEAD: cámara.
- GAIN: ganancia.

- CCDTEMP: temperatura del detector.
- EXPOSURE: tiempo de exposición.

Las figuras 14 y 15 muestran ejemplos del código de creación de nombres y los resultados de dichos nombres respectivamente en algunos ejemplos seleccionados. Como se puede comprobar, los archivos generados tienen una convención de nombre que hace claro y transparente el contenido de los mismos.

```

IF CAMERA EQ 'SWIR' THEN Master_Dark_Name = 'Master_Dark_'+CAMERA+'_Exp'+st_EXPOSURE+'_G'+sGAIN+'_T'+sCCDTEMP+'.fits'
IF CAMERA EQ 'VIS' THEN Master_Dark_Name = 'Master_Dark_'+CAMERA+'_Exp'+st_EXPOSURE+'_T'+sCCDTEMP+'.fits'
  
```

Figura 14: Creación de los nombres de los archivos Master Dark en función de las cámaras utilizadas.

 Master_Dark_SWIR_Exp00.6968_G0260_T-6.8.fits
 Master_Dark_VIS_Exp00.1500_T-22.4.fits

Figura 15: Ejemplos de los archivos generados con nombres automáticos elegidos por el software.

Como se observa en la figura 15, algunos de los parámetros utilizados en la creación de los nombres tienen el propio nombre modificado. Esto se debe a que se han realizado algunas modificaciones a los valores guardados en ellos para que los nombres se puedan leer de una manera más sencilla. A estas modificaciones se les cambia el nombre para no perder el valor inicial de los parámetros, el cual se va a utilizar más adelante.

A continuación, se le indica al programa que analice el directorio que se encuentra antes de la carpeta seleccionada. Si en él no se encuentra una carpeta con el nombre MASTER_DARK se crea para que se guarden ahí los archivos Master Dark creados, si existe la carpeta, se le indica que los archivos serán guardados ahí.

Para finalizar, toda la información obtenida del archivo Dark se debe guardar en el nuevo archivo Master Dark. Se guarda en la cabecera del nuevo archivo Master Dark todos los parámetros antes cargados de la cabecera del archivo Dark. Este archivo se guarda en la carpeta MASTER_DARK con el nombre generado para él.

Por último, en la ventana “Messages” aparecerá el número de capas que contenía el archivo, el directorio en el que se ha guardado y el nombre con el que se ha guardado el archivo generado Master Dark. La figura 16 muestra parte del código necesario para generar estos mensajes interactuando con la interfaz gráfica de IDL mediante comandos Widget Control.

```

;-----
Widget_Control,Msg_Txt_ID,GET_VALUE = TEXT_MESSAGE
Text_Message=[Text_Message, ' File done with Nframes: '+ StrCompress(String(Frame_Counter),/REMOVE_ALL)]
Text_Message=[Text_Message, ' Master Dark name: ' + MASTER_DARK_NAME]
Text_Message=[Text_Message, ' Saved at directory: ' + MASTER_DARKS_DIR]
Widget_Control,Msg_Txt_ID,Set_Text_Top_Line=9000,SET_VALUE = Text_Message
;-----
  
```

Figura 16: Código utilizado para la muestra de mensajes en PLAYLIST.

4.3 Procesado de los Flats

Tal y como se explica en el capítulo anterior, el procesado de los Master Flats es muy parecido al de los Master Darks, ya que inicialmente se obtienen sumando capas de un archivo de Flats. Por esta razón, el procedimiento que se ha utilizado en el programa para el procesamiento de estos es el mismo que el de los Darks con una diferencia crucial, a los archivos Flats es necesario substraer los archivos Master Darks correspondientes por razones expuestas en el capítulo anterior (3.3.2). En la figura 17 se muestra el diagrama de flujo que resume el procesado de archivos Flats.

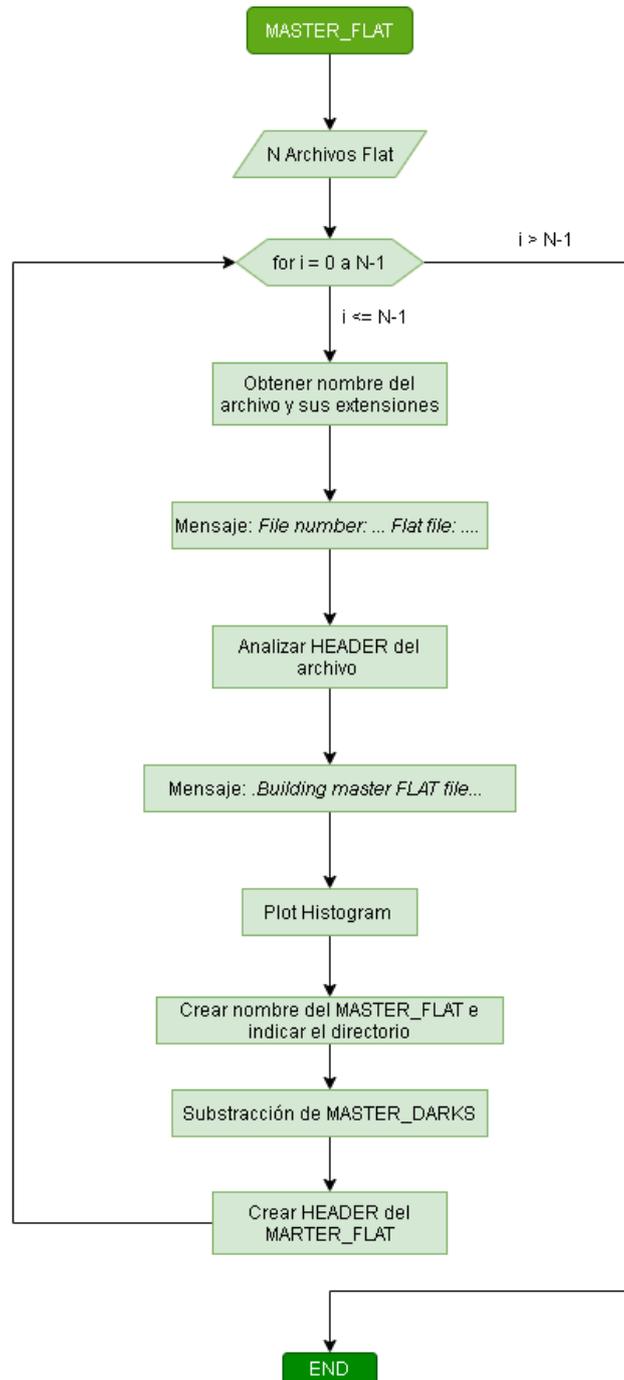


Figura 17: Diagrama de flujo del procesado de archivos Flats.

4.3.1 Substracción de Master Dark

Para conseguir el Master Flat, se debe eliminar previamente el efecto de la corriente de oscuridad. Para ello el primer paso es indicarle al programa dónde debe buscar los archivos Master Dark correspondientes. Una vez indicada la carpeta se buscan todos los archivos válidos para el análisis. El programa lee los nombres de los archivos que se encuentran en la carpeta buscando las palabras “Master Dark”. Todos los archivos que encuentre los guarda en una variable para después analizarlos.

Al igual que en el procesamiento de Darks y Flats se analizan las cabeceras de cada archivo para después compararlos con los del Flat que se esté analizando y así encontrar el adecuado. En la comparación se utilizan intervalos en lugar de valores exactos ya que es posible que sea difícil encontrar el valor exacto en ciertos parámetros. Un caso característico es la temperatura del detector, que puede oscilar unas décimas entre la adquisición de los Darks y los Flats o incluso algunos grados a lo largo de una secuencia de observaciones larga.

Para que un archivo Master Dark sea el adecuado para la substracción es necesario que coincidan cinco parámetros que se obtienen de las cabeceras de los archivos. Estos parámetros son: XBINNING, YBINNING, GAIN, EXPOSURE y CCDTEMP. Si los 5 parámetros coinciden (los tres últimos en una comparación con cierto margen por encima y por debajo) entonces el archivo es el adecuado y se substraee del archivo Flat, consiguiendo así una imagen Flat sin ruido electrónico.

En este caso, en la ventana “Messages” aparecerá un mensaje indicando el nombre del Master Dark que coincide y su directorio. Después de esto, al Master Flat que se ha creado anteriormente con la suma de las capas se le resta el Master Dark. Si no hay coincidencias, el mensaje indicará que no se ha encontrado ningún archivo.

4.4 Cambios adicionales en PLAYLIST

A lo largo del proyecto han ido apareciendo ciertos problemas los cuales se han ido solucionando modificando diferentes aspectos. Dichos problemas están relacionados con hacer el programa más eficiente en cuanto a tiempo, problemas de conflicto por el uso de los dos detectores o interfaces que precisaban de elementos explicativos. Estos problemas se exponen en los siguientes puntos.

4.4.1 Tiempos de ejecución

Una vez terminada la automatización del procesado de los Darks, a medida que el programa iba analizando los diferentes ficheros, con cada uno de ellos el programa funcionaba cada vez más lento.

Este problema era de tal magnitud que se manifestaba de manera clara con tan solo tres ficheros analizados. Teniendo en cuenta, que las observaciones realizadas tienen entre 80 y 400 archivos diferentes, el programa tardaría horas (incluso días) en hacerlo, por lo que no cumpliría con su objetivo ya que sería peor que el procesado manual ya existente.

Tras analizar el código entero del programa [plist_calibration.pro](#), se ha encontrado el problema en la muestra de información de cada capa de cada archivo mediante la ventana "Messages". Esta manera de exponer la información hace que el programa tenga que enviar a la interfaz gráfica PLAYLIST la información obtenida en cada capa de cada archivo de manera individual, ralentizando mucho más el proceso en general.

Esta manera de revelar la información es costosa para IDL. Como solución, se ha decidido eliminar la exposición de esta información ya que no es importante para el usuario. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de la diferencia de tiempo tras los cambios realizados en el código. Como se puede observar, el tiempo se reduce más de 5 veces.

```
Total time to build automatic darks:      414.34900  
  
Total time to build automatic darks:      82.665000
```

Figura 18: Tiempo total necesario para procesar de manera automática 5 archivos Dark. La parte superior es el tiempo antes de las mejoras y la parte inferior tras las mejoras.

4.4.2 Distintas cabeceras para SWIR y VIS

Como se ha explicado anteriormente, para la creación de los nombres de los archivos master, se utiliza la información obtenida de las cabeceras. Los archivos generados mediante el canal SWIR o el canal VIS tienen cabeceras con parámetros e información diferentes. Por esta razón, a la hora de introducir la información en las cabeceras de los archivos master generados y sus nombres se tiene en cuenta el canal utilizado.

Además, en la substracción de los Darks en el procesado de los Flat, se analizan las cabeceras y se tiene en cuenta la diferencia de información entre los canales. Por ejemplo, en la información de la ganancia del canal VIS no aparece un número como en el canal SWIR, sino que aparecen letras. Para poder encontrar el Dark correspondiente sin errores, se modifica la variable de la ganancia del canal VIS insertándole un valor aleatorio para que pueda analizar todos los parámetros sin problemas.

4.4.3 Visualización

Tal y como se explica en el apartado 3.1 *Funcionamiento general de PLAYLIST* del capítulo 3 de este documento, mediante la ventana “Correlation info” se visualizan la imagen de referencia, cada fotograma del archivo, la diferencia entre ambas y el mapa de correlación.

En la figura 17 se muestran las diferencias de visualización entre el código original y el código modificado. Los cambios radican en los bordes marcados alrededor de las 4 imágenes para obtener una separación más clara entre el fondo y la imagen y el nombramiento de cada fotograma mediante un pequeño título en la zona superior de las imágenes.

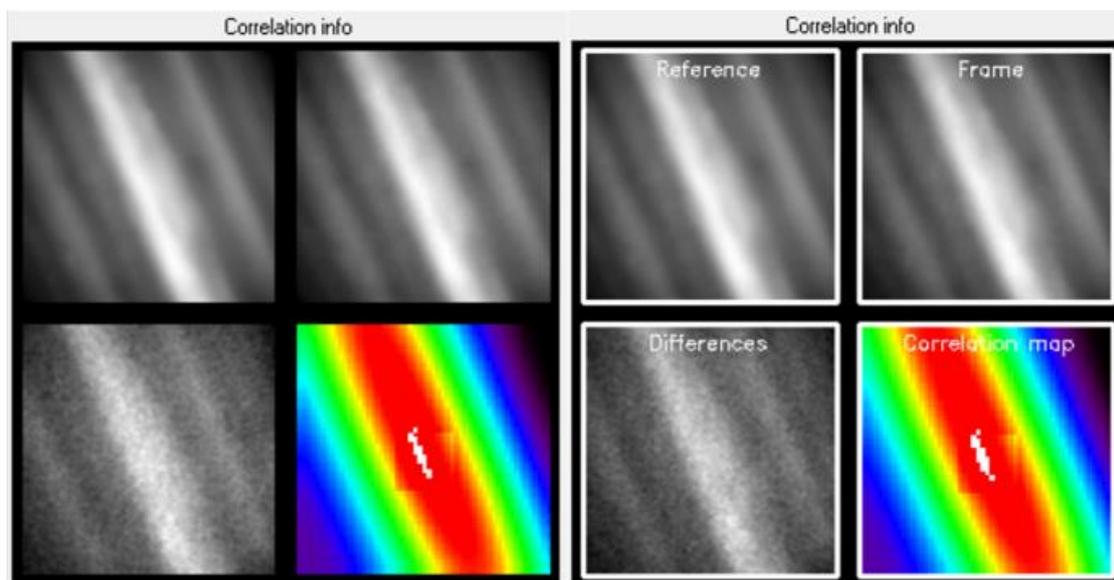


Figura 19: Ejemplos de los cambios realizados en la programación respecto a la visualización de las imágenes. La imagen de la izquierda muestra la visualización mientras que la derecha tras los cambios realizados.

Estos cambios mejoran la visualización de las imágenes para el usuario y permite entender de una manera fácil y simple lo que se está mostrando en cada una de las cuatro imágenes que se enseñan en la ventana de “Correlation info”. Especialmente este cambio permite una mejor comprensión de la interfaz para nuevos usuarios.

4.4.4 Comprobación de observaciones ya procesadas mediante PLAYLIST

Al indicarle al programa PLAYLIST el archivo que se quiere procesar o la carpeta en la que se encuentran los archivos, es posible que alguno de ellos ya haya sido procesado anteriormente. Para que el programa no pierda tiempo en volver a procesar una imagen ya tratada, se ha modificado el código para que el programa estudie si el archivo ya ha

sido procesado o no previamente a comenzar con las labores de procesamiento que haría en caso de no haberla tratado nunca.

Para ello, como se muestra en la figura 20, se han agregado unas líneas al código `playlist_make_file.pro`. El primer paso consiste en el análisis de la cabecera para comprobar la cámara que se ha utilizado a la hora de obtener las imágenes. Se indica que desde un principio la variable CHANNEL estará guardado como VIS; es decir, como si se hubiera utilizado la cámara del canal visible independientemente de que haya sido así o no. Si al estudiar el parámetro CAMERA de la cabecera aparece la palabra “Raptor” en ella entonces se modifica la variable para guardarla como SWIR.

Una vez obtenido el tipo de cámara, se crea el directorio en el que se guardaría el archivo. Si este directorio existe, entonces en la ventana “Messages” de PLAYLIST aparecerá un mensaje indicando que el archivo ya ha sido procesado anteriormente y el directorio en el que se encuentra. Tras esto, se salta al siguiente archivo o se finaliza el programa. Si el directorio creado no existe, empieza el análisis del archivo de manera normal. Este procedimiento se realiza con cada archivo que se quiera procesar.

```
CHANNEL = 'VIS'
IF (StrMatch(Camera, '*Raptor*', /FOLD_CASE) EQ 1) THEN Channel='SWIR'

Test_Directory = Directory + '..'+SLASH_CHAR+'..' + SLASH_CHAR + 'Results_' + CHANNEL + SLASH_CHAR + OBJECT + SLASH_CHAR + Base_File_Name
Result_Test_Dir = File_test (Test_Directory, /Directory)

IF Result_Test_Dir EQ 1 THEN BEGIN
  Widget_Control,Msg_Txt_ID,GET_VALUE = This_Message
  This_Message = [This_Message, '-----' ]
  This_Message = [This_Message, ' Selected file: ' + File_name ]
  This_Message = [This_Message, ' WARNING: The file has already been processed' ]
  This_Message = [This_Message, ' File directory: ' + Test_Directory ]
  This_Message = [This_Message, '-----' ]
  Widget_Control,Msg_Txt_ID,Set_Text_Top_Line=99999,SET_VALUE = This_Message,/APPEND
  GOTO, SIGNAL_END
ENDIF
```

Figura 20: Código utilizado para la comprobación de imágenes ya procesadas mediante PLAYLIST.

4.5 Resultados de imágenes de PlanetCam procesadas con la PLAYLIST actual (Canal SWIR)

Para terminar, en este apartado se mostrarán dos ejemplos del uso del software sobre una secuencia de adquisición de imágenes de Saturno en el canal SWIR y una secuencia de imágenes de Neptuno reales.

Primeramente, es importante mencionar que esta elección de objetivos se basa en parte para comprender el poder de las técnicas informáticas sobre el tratamiento de imágenes. Por un lado, Saturno puede considerarse como un objetivo relativamente sencillo, dado que puede ser visto desde telescopios de muy poco diámetro al contar con un tamaño angular y un brillo considerables. A pesar de ser un gigante helado, la lejanía de Neptuno con respecto a la Tierra le hace un objetivo con un tamaño angular

y un brillo muy pequeños. En comparación, mientras que Saturno tiene un tamaño angular medio de 17.2 arcosegundos, Neptuno tiene unos 2.4 arcosegundos de media.

El pequeño tamaño de Neptuno lo vuelve un objetivo complejo que, como veremos, sin técnicas como el Lucky Imaging resultaría muy difícil de observar.

En la figura 21 se muestran seis diferentes imágenes del planeta Saturno en función del procesamiento que se ha aplicado en ellas. Todos estos pasos ocurren durante el procesamiento de una imagen en PLAYLIST. A continuación, se indica el procesamiento dado a cada una de ellas.

La primera imagen (1) es un fotograma individual de una observación directa del planeta sin ningún procesamiento Dark o Flat. En ella se observan píxeles calientes no corregidos y efecto de motas de polvo que hay en el telescopio que en la imagen caen los anillos del planeta. En la segunda imagen (2) se ilustra un fotograma individual del planeta con las correcciones de Darks y Flats. Se observa que los píxeles calientes y el efecto de las motas de polvo de la primera imagen han sido eliminados, mostrando una imagen del planeta con menos defectos.

En la tercera imagen (3) se ha realizado el apilamiento (stacking) de los 4000 fotogramas obtenidos durante 90 segundos en la observación del planeta. Se aprecia la mejora en la nitidez de la imagen comparándola con la segunda imagen, sobre todo en los anillos. Además, se infiere un leve aumento del brillo en algunas regiones del planeta como en las zonas polares. En la cuarta imagen (4) se realiza el stacking del mejor 1% de los 4000 fotogramas de la observación. Con esta selección de imágenes se obtiene una imagen más clara y nítida, en la cual se pueden observar detalles de la atmósfera del planeta. Por ejemplo, la división de Cassini aparece más contrastada y se aprecia el hexágono polar de Saturno.

La quinta imagen (5) muestra el resultado de aplicar un filtro paso alto a la anterior imagen. La aplicación de este filtro permite observar detalles antes imperceptibles de una manera más obvia debido a la mejora de la visibilidad. Estos detalles pueden ser los anillos interiores junto a la división de Maxwell. Además, en la atmósfera, en las bandas más oscuras se aprecian algunas bandas finas más claras que su entorno. Sin embargo, la aplicación de estos filtros también tiene inconvenientes, como la reaparición de motas de polvo del detector sobre la imagen como consecuencia del incremento de contraste de la imagen.

Por último, para mejorar la calidad, en la sexta imagen (6) se muestra el resultado de apilar distintas tomas de diferentes videos cortos junto con un procesamiento de derotación mediante el programa externo WinJupos. Este procesamiento consigue eliminar por completo las motas de polvo y ofrece el mejor resultado en términos de resolución espacial de la imagen.

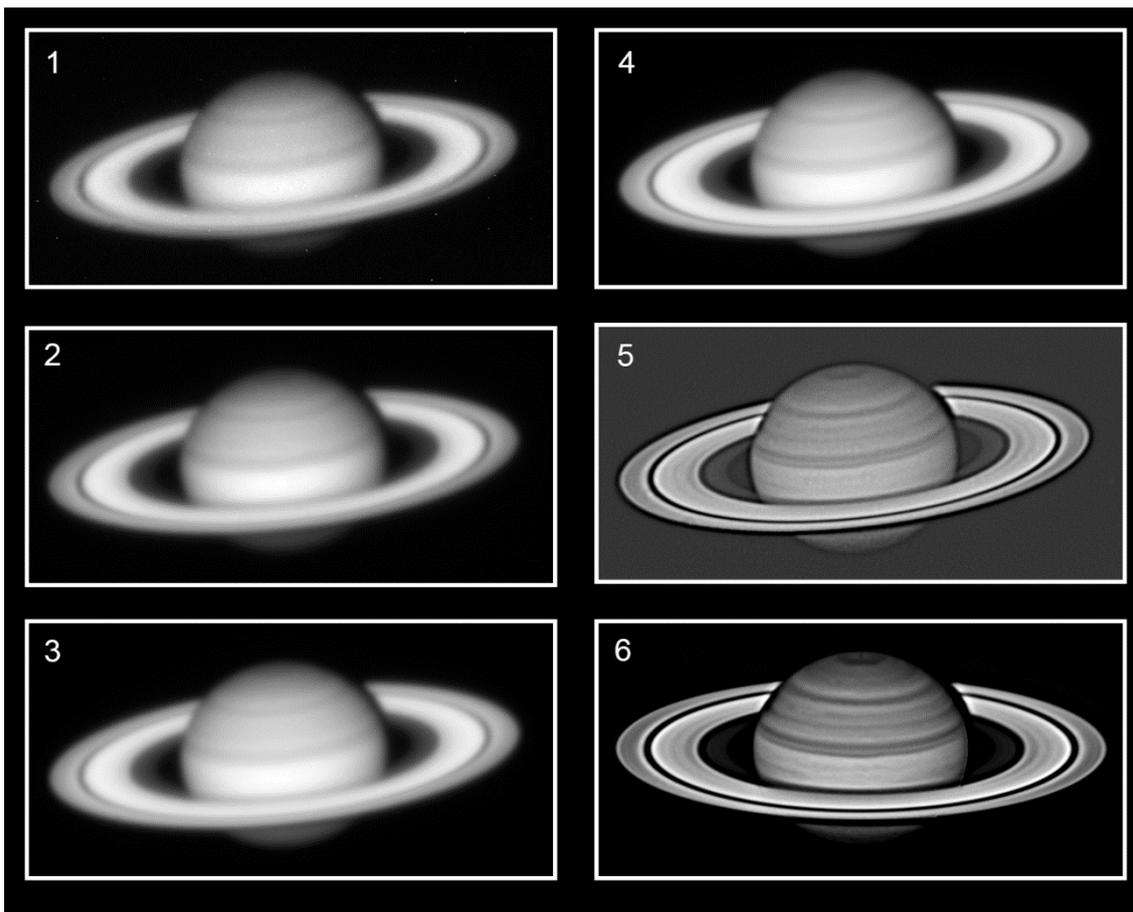


Figura 21: Ejemplo de uso de PLAYLIST sobre imágenes de Saturno adquiridas el 8 de junio de 2021.

La figura 22 muestra un ejemplo equivalente para Neptuno y Tritón. En este caso el tiempo de exposición de cada fotograma es de 1 segundo a lo largo de 10 minutos. El tiempo de exposición más elevado resulta en una gran corriente de oscuridad visible en la figura.

La primera imagen (1), al igual que en el ejemplo de Saturno, es un fotograma individual de una observación directa sin procesado de Dark ni Flat. Como se ha mencionado antes, debido a su pequeño tamaño y poco brillo, Neptuno precisa del procesamiento de Darks y Flats. Aun así, se puede distinguir Neptuno como una región difusa en la imagen (1). Este procesado se muestra en la segunda imagen (2) en la cual mejora sustancialmente la visibilidad de los objetos de la imagen: a la derecha, más brillante y grande, se encuentra el planeta Neptuno, arriba a la izquierda se muestra su satélite Tritón. Aun así, en esta imagen no se aprecia de manera clara la forma real de los objetos por lo que no se podría diferenciar de un objeto del espacio profundo.

En la tercera imagen (3) se realiza el stacking de los 600 fotogramas realizados en la observación del planeta. Se aprecia la eliminación del ruido de fondo de la imagen y una mejora de las formas de los objetos ilustrado en ella. Al ser el ruido de fondo aleatorio,

el apilado y suma de varias imágenes hará que, por un lado, Neptuno y su satélite Tritón se definan mucho mejor y, por otro lado, el ruido (que es aleatorio en cada imagen) se promedie a un valor mucho más bajo que el mostrado en imágenes individuales como la 2. Así pues, se consiguen objetos bien definidos, aunque levemente desenfocados y un fondo sin prácticamente ningún ruido.

Por último, la cuarta imagen (4) es el resultado de la aplicación de filtros de paso alto sobre la imagen (3) que permiten eliminar ese desenfoco y obtener imágenes mucho más definidas del planeta y su satélite. En esta imagen, se observa detalles brillantes situados en la región subpolar sur del planeta Neptuno, así como la significativa mejora de la visibilidad del satélite Tritón.

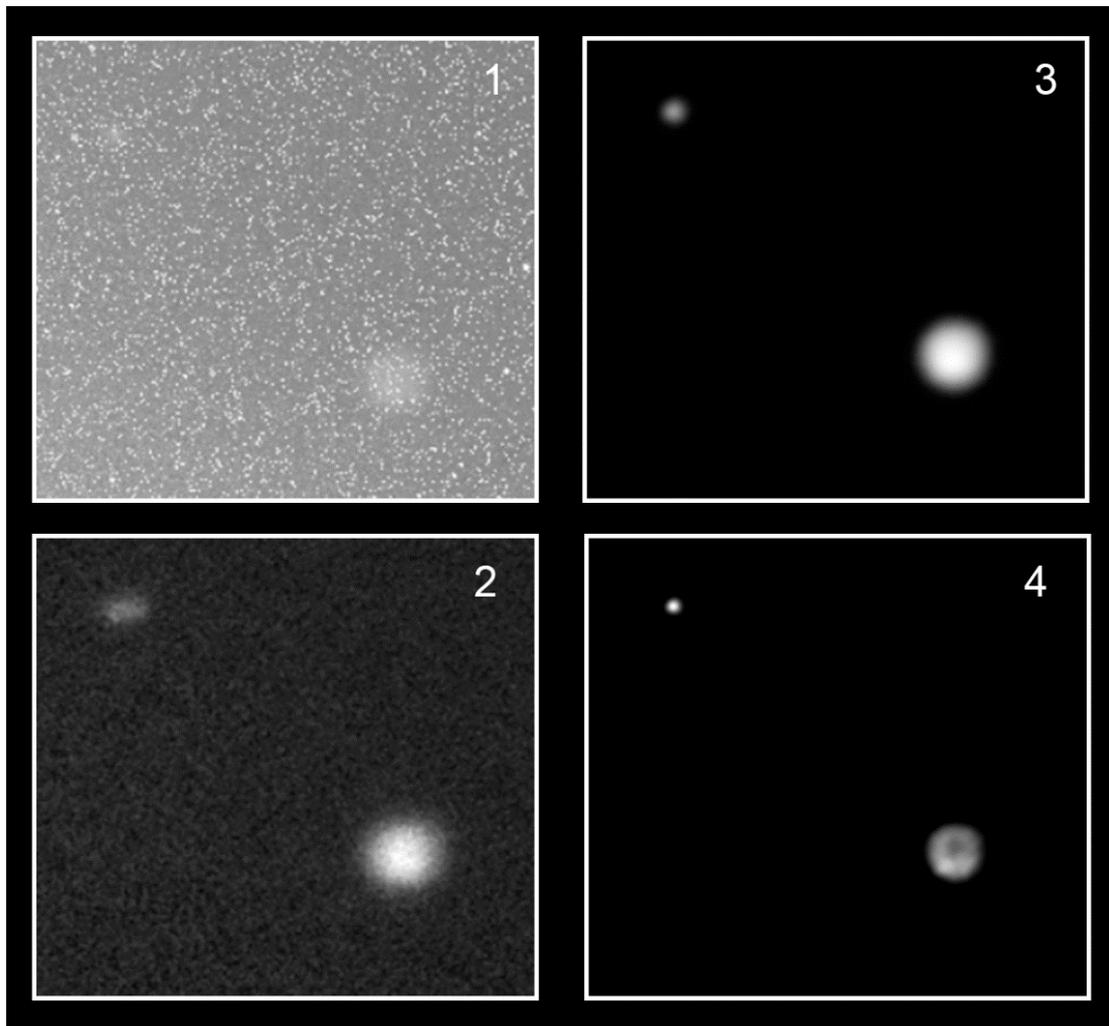


Figura 22: Ejemplo de uso de PLAYLIST sobre imágenes de Neptuno adquiridas el 20 de julio de 2021.

Algo curioso y que es importante recalcar es que, en el caso de Neptuno, la imagen *raw* es lo que se obtiene con un telescopio de 2.2 m ubicado en el observatorio de Calar Alto. El criterio de Rayleigh permite relacionar el tamaño angular de un objeto con el tamaño que debe tener el telescopio para una longitud de onda específica.

Su deducción parte de suponer una fuente puntual, cuya ecuación que define su disco de luz es una función de Bessel de primer orden. Partiendo de que la intensidad de una fuente puntual puede ser expresada de la siguiente manera:

$$I(\theta) = I(0) \frac{\left(2 J_1\left(\frac{\pi \cdot \theta \cdot D}{\lambda}\right)\right)}{\frac{\pi \cdot \theta \cdot D}{\lambda}}$$

Donde $I(\theta)$ es la intensidad de la luz de la fuente puntual en un punto separado de su origen en radianes, $I(0)$ la intensidad de brillo en el centro del objeto (máxima), J_1 es la función de Bessel de primer orden, λ es la longitud de onda a la que se está evaluando la situación, D el diámetro o apertura del telescopio y θ el tamaño angular del objeto en radianes. En el momento el que la función de Bessel se anule, la intensidad será cero. El primer nulo de la función de Bessel está aproximadamente en 3.832, por lo que:

$$J_1(3.832) = 0 = J_1\left(\frac{\pi \cdot \theta \cdot D}{\lambda}\right) \rightarrow \frac{\pi \cdot \theta \cdot D}{\lambda} = 3.832 \rightarrow \theta \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

El límite de difracción de un telescopio de 2.2m a una longitud de 1.2 micras es de 0.137'' mientras que el tamaño aparente de un objeto como Neptuno en la imagen superior es de 2.27'' y el disco de Tritón es de 0.124''. La imagen casi puntual de Tritón de la imagen anterior obtenida tras el procesado muestra que la observación final alcanza una resolución espacial cercana al límite de difracción. El seeing medido en el observatorio durante la adquisición de estas imágenes es estimado en torno a 0.7 a 1.0'' a partir de las imágenes individuales de Neptuno y Tritón. La calidad de las imágenes finales muestra como la técnica de lucky imaging alcanza una gran mejoría con respecto a los efectos de la turbulencia.

En el caso de objetos de muy alto contraste, como las divisiones principales de los anillos de Saturno la imagen final de la figura 21 muestra algunos detalles de la división de Encke (de 350 km de tamaño) cuyo tamaño angular es de unos 0.05'' mostrando cómo el límite de resolución impuesto por el criterio de Rayleigh puede superarse en el caso de objetos extensos de alto contraste. Muchos de los detalles atmosféricos de ambas imágenes están creados por estructuras meteorológicas de menor tamaño a las marcadas por el criterio de resolución de Rayleigh. Esta discrepancia de resolución con el criterio de Rayleigh es mayor aún con telescopios de menor diámetro menos afectado por diferentes células de turbulencia, dando la posibilidad a astrónomos aficionados de resolver estructuras meteorológicas de pequeño tamaño en planetas brillantes.

En cualquier caso, la resolución máxima de imágenes astronómicas como esta solo puede obtenerse sobre una versión limpia y sin defectos requiriendo por lo tanto de un correcto uso de la corrección de defectos de darks y flats. Este ha sido el objetivo fundamental de este trabajo.

En estos ejemplos se ha utilizado la versión de PLAYLIST generada durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster y esta nueva versión ha sido utilizada de manera estándar en las campañas de observación de junio y julio de 2021. En estas campañas el nuevo PLAYLIST ha analizado unos 150 y 350 archivos respectivamente (en la campaña de julio se produjeron importantes variaciones de temperatura requiriendo largas series de calibración de Darks). En cada caso PLAYLIST ha generado los archivos de calibración de manera automática en tiempos de entre 1 hora a 1 hora y media cuando el uso de la versión anterior del software hubiera requerido el equivalente a unos dos o tres días de trabajo para ambas campañas. Por lo tanto, queda claro la mejora introducida en el software, que con estos nuevos cambios ha sido aprobada por el Grupo de Ciencias Planetarias para su uso estándar en las próximas campañas de observación con el instrumento PlanetCam.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo se ha centrado en la mejora de la *pipeline* PLAYLIST.

En primer lugar, se debe mencionar que PLAYLIST es una interfaz de uso simple, ya desde el comienzo de este trabajo una labor importante fue familiarizarse con ella. A pesar de tener una interfaz limpia e intuitiva, los programas que la componen y la hacen funcionar son relativamente complejos y su entendimiento supone un desafío a considerar.

En segundo lugar, el estudio, mejoras y optimización del código ha desembocado en una mejora sustancial del mismo y, por tanto, una mejora en el uso de PLAYLIST para el tratamiento de imágenes astronómicas. Las mejoras realizadas han sido las siguientes:

- Mejora del tiempo necesario para el procesado de la imagen: La necesidad de obtener los Master Dark y Master Flat convertía el uso de PLAYLIST en algo muy tedioso. La automatización de este proceso ha conseguido reducir el tiempo de entre 8-24 horas a como mucho una hora.
- Mejora de errores de conflicto: Se ha conseguido eliminar errores en la generación de archivos Master que aparecían en PLAYLIST cuando en una misma sesión de observación astronómica se usaban las cámaras SWIR y VIS.
- Mejora leve en la interfaz: El añadido de títulos en las ventanas de PLAYLIST es un cambio menor pero que mejora la comprensión del programa especialmente para nuevos usuarios.
- Mejora en la comprobación automática: Se ha mejorado el software de modo que este es capaz de detectar si un archivo ya ha sido tratado anteriormente, en cuyo caso manda un aviso al usuario a través de la interfaz.

Finalmente, se ha podido comprobar el correcto funcionamiento de PLAYLIST junto con las mejoras en su automatización en una observación en Junio y Julio. Se han podido ver los resultados de los procesados realizados y la mejora sustancial de las imágenes. Especialmente el caso de Neptuno muestra una mejora sustancial con respecto a la imagen *raw* obtenida en un principio. También en Saturno se ha conseguido una mejora sustancial permitiendo ver los anillos interiores del planeta, así como diferentes estructuras atmosféricas que en la imagen *raw* eran indistinguibles.

6. REFERENCIAS

- Hormuth. (2007). *Astralux: High resolution angular astronomy with an electron multiplying CCD, Ph.D Thesis*. Universidad de Heidelberg.
- Hueso. (01 de 12 de 2020). Procesado en el espacio de frecuencias. Bilbao, Vizcaya, España: UPV/EHU.
- Hueso et al. (2015). PlanetCam UPV/EHU: Una cámara lucky imaging para el estudio del sistema solar en el rango de longitudes de onda de 0.38 a 1.7 microns. *IV Reunión sobre Ciencias Planetarias y Exploración del Sistema Solar (CPESS4)*, (pág. 34). Alicante.
- Law et al. (2006). Lucky imaging: high angular resolution imaging in the visible from the ground. *Astronomy & astrophysics*, 446, 739-745.
- Mendikoa et al. (2016). A two channel lucky imaging camera for Solar System studies in the spectral range 0.38-1.7 microns. *Astronomical Society of the Pacific*, 128, 22.
- Mendikoa et al. (2017). Temporal and spatial variations of the absolute reflectivity of Jupiter and Saturn from 0.38 to 1.7 microns with PlanetCal-UPV/EHU. *Astronomy & Astrophysics*, 72, 13.
- Sánchez-Lavega et al. (2012). PlanetCam UPV/EHU: a simultaneous visible and near infrared lucky-imaging camera to study solar system objects. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*, 8446, 9.
- Zago. (29 de 08 de 2021). *Seeing*. Obtenido de <https://www.eso.org/gen-fac/pubs/astclim/papers/lz-thesis/node11.html>