



UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA  
FACULTAD DE CIENCIAS, SECCIÓN DE FÍSICA

MÁSTER EN ASTROFÍSICA  
TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

---

CALCULADORA DE TIEMPO DE EXPOSICIÓN PARA LOS  
INSTRUMENTOS DEL IAC80: CAMELOT2 Y CARONTE

---

Sofía Lamolda Mir

Supervisores:

Dr. David López Fernández-Nespral  
Dra. Rosa Clavero Jiménez

Julio 2024

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	¿Qué es la Fotometría?	1
1.1.1	Sistemas fotométricos	2
1.1.2	Clasificación estelar y escala de magnitudes	4
1.1.3	Flujo y luminosidad de una estrella	4
1.1.4	Índice de color	5
1.2	Tratamiento de los datos fotométricos	5
1.2.1	Magnitudes fotométricas y número de cuentas	5
1.2.2	Extracción de los datos	5
1.2.3	Calibración fotométrica	5
1.3	Relación Señal-Ruido	7
1.4	Observatorio del Teide	8
1.4.1	Telescopio IAC 80	9
1.4.2	Instrumentos	9
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>12</b>
3.1	Análisis teórico	12
3.1.1	Exposure Time Calculator	12
3.2	Datos utilizados	21
3.2.1	Selección de fuentes	21
3.3	Análisis experimental	21
3.3.1	Magnitudes aparentes	23
3.3.2	Tiempo de exposición y masa de aire	23
3.3.3	Fondo de cielo de la imagen	23
3.3.4	Número de cuentas o flujo del objeto	24
3.3.5	Número de cuentas en el pico del objeto	25
3.3.6	Relación S/N	26
3.4	Comprobación del funcionamiento de la calculadora	26
<b>4</b>	<b>Resultados obtenidos y discusión</b>	<b>27</b>
4.1	CAMELOT2	27
4.1.1	Fondo de cielo	27
4.1.2	Flujo del objeto	28
4.1.3	Pico del objeto	28
4.1.4	Relación S/N	29
4.2	CARONTE	30
4.2.1	Fondo de cielo	30
4.2.2	Flujo del objeto	32
4.2.3	Pico del objeto	33
4.2.4	Relación S/N	34
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>38</b>
5.1	Trabajo Futuro	40
<b>A</b>	<b>Anexo</b>	<b>41</b>
A.1	CAMELOT2	41
A.1.1	Resultados Flujo del objeto	41
A.1.2	Resultados Pico del objeto	41
A.1.3	Resultados S/N	41
A.2	CARONTE	42
A.2.1	Resultados Flujo del objeto	42
A.2.2	Resultados Pico del objeto	42
A.2.3	Resultados S/N	42

## Resumen

En este trabajo de Fin de Máster se ha actualizado la calculadora de tiempo de exposición (ETC) de la cámara CAMELOT2 del IAC80 en el Observatorio del Teide y se ha desarrollado una nueva para la cámara CARONTE, que anteriormente carecía de ella.

Dado que la ETC existente de CAMELOT2, programada en PHP, está basada en la calculadora de tiempo de exposición del ING (Isaac Newton Group of Telescopes), en primer lugar se ha realizado un análisis exhaustivo del funcionamiento de esta calculadora. De esta forma ha sido posible comprender cada una de las funciones definidas, así como los parámetros y variables que influyen en el resultado que se obtiene tras emplear la ETC.

Tras analizar cada uno de los parámetros se han actualizado los correspondientes a CAMELOT2 y se ha montado una ETC de prueba para CARONTE.

Para verificar su comportamiento se ha desarrollado un script de Python que nos permite obtener, mediante fotometría, los valores del número de cuentas del objeto y del cielo, el número de cuentas del pico de los objetos y la relación Señal-Ruido. Se ha empleado un conjunto de imágenes tomadas durante dos noches fotométricas por el investigador Manuel Sánchez Benavente con cada una de las cámaras del IAC80, así como un catálogo de estrellas estándares que contiene los valores de magnitud aparente para un total de 84535 objetos de diferentes cúmulos estelares y globulares de la Vía Láctea ([Stetson \(2000\)](#)).

A partir de los resultados obtenidos, en el caso de CAMELOT2, se observa una mejora significativa tras la actualización y en lo referente a CARONTE se obtienen resultados satisfactorios.

## Abstract

A very useful tool for astronomers when making observations is the Exposure Time Calculator (ETC). This tool determines the exposure time required for the signal received from an object of magnitude  $m$  to be the indicated exposure time or vice versa.

After the characterization of the IAC80 filters and the aluminization of the telescope mirrors, it is essential to update the current ETC of the CAMELOT2 camera. Therefore, in this work, the exposure time calculator (ETC) of the CAMELOT2 camera of the IAC80 at the Teide Observatory in Tenerife has been updated and a new one has been developed for the CARONTE camera, which previously lacked it.

The aim is to improve the quality of the astronomical observations and to optimize the observing time when using these instruments.

First, an exhaustive analysis of the operation of the ING (Isaac Newton Group of Telescopes) exposure time calculator has been carried out. This analysis involved a comprehensive review of each defined function, as well as the parameters and variables that influence the results of the ETC.

These parameters and variables are related to the technical characteristics of the filters, the detector and the telescope itself. After analyzing each of the parameters, those corresponding to CAMELOT2 has been updated and a test ETC for CARONTE has been set up.

On the other hand, to use the calculator it is necessary to indicate which filter is used, the operating mode of the detector, the characteristics of the object to be analysed (its apparent magnitude and whether it is extended or point), as well as the atmospheric conditions of the night (sky brightness, seeing, air mass and atmospheric extinction). Therefore, each of these variables has been studied and it has been seen how a small variation of them influences the results obtained.

To verify the behavior of these calculator, a Python script has been developed to obtain, using photometry, the values of the star counts, the sky counts, the peak of the objects and the Signal to Noise ratio. For this purpose, the script uses a set of images taken during two photometric nights by researcher Manuel Sánchez Benavente with each of the IAC80 cameras on November 4, 2023 and June 5, 2024. In addition, it is necessary to use a standard star catalog (Stetson (2000)) containing the apparent magnitude for 84535 objects from different clusters of the Milky Way in each of the UBVRI filters. This makes it possible to obtain results experimentally to test the performance of the calculators.

The selected stars belong to the clusters NGC 6490 and NGC 6633. To choose them we have made use of the Aladin software, which allows us to check which stars from the available catalogue are in the field of view of the provided images.

Before working with the astronomical images it was necessary to obtain the sky background value. Subtracting the number of sky counts from the number of star counts in the image, it gives the actual number of counts provided by the star. For this purpose aperture photometry has been used. In addition it has been necessary to carry out an analysis to find out which variables affect its magnitude. The main factor affecting sky brightness is the presence or absence of the moon. In our particular case, the images we have were taken at times of the night when there was no Moon, so initially the dark night option was used in the ETC. In addition, factors such as zodiacal light, atmospheric conditions and the galactic and ecliptic position of the target source, as well as the solar cycle also affect the sky brightness value.

Regarding the results obtained, it is observed that, for both cameras, the variation of both the number of counts of the object and the peak as well as the Signal to Noise ratio decreases as the magnitude of the object increases. This makes sense since for fainter objects the amount of photons emitted is lower than for brighter objects and therefore, the number of photons collected by the telescope is also lower.

In the case of CAMELOT2, a considerable improvement has been observed with respect to the outdated ETC, as the errors that are presented decrease considerably when updating

the parameters.

In the case of CARONTE no old ETC is available to compare the results, but in any case satisfactory results have been obtained.

On the other hand the sky background values obtained from the ETC were very different from those acquired from the images. A more detailed analysis was therefore carried out and it was found that the values measured in the ORM were taken during a period of time when the solar cycle was minimal. We are currently at a maximum of the solar cycle, which means an increase in sky brightness of 0.5 mag. In addition, the clusters to which the selected stars belong are very close to the ecliptic, which implies that the sky brightness is up to 0.4 mag higher.

In conclusion, this study has successfully updated and developed exposure time calculators for two critical instruments at the IAC80.

Future work could focus on further fine-tuning these calculators, exploring their application to other instruments, analysing extensive objects, or testing their performance for the narrow filters available for the IAC80. In addition, it is proposed to carry out a study of the sky background brightness at the Teide Observatory for dark, grey and bright nights.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 ¿Qué es la Fotometría?

En astronomía observacional, la radiación incidente del espacio interestelar y de los objetos celestes, junto con las astropartículas y las ondas gravitacionales, es prácticamente la única fuente de información que se tiene para conocer las propiedades de los objetos astronómicos. A lo largo de la historia, uno de los mayores objetivos de los astrónomos ha sido cuantificar y caracterizar la radiación electromagnética incidente de estos objetos (Duerbeck (2009)) para así conocer las distintas propiedades físicas de los cuerpos celestes (como las magnitudes aparentes, el color, la morfología...). Esta técnica se conoce como fotometría.

La radiación electromagnética que incide en los telescopios terrestres es significativamente menor a la que emerge de los objetos astrofísicos. Esto es debido a los diferentes obstáculos que encuentra la luz en su camino hacia la Tierra.

En primer lugar, la radiación emergente es absorbida y dispersada por el polvo y gas del medio interestelar. Una vez que la radiación alcanza la Tierra, atravesando todo ese medio, esta debe traspasar la atmósfera terrestre. Las moléculas y partículas de polvo de la atmósfera absorberán o dispersarán ciertas longitudes de onda, haciendo que la radiación sufra un oscurecimiento y enrojecimiento, lo que se conoce como extinción atmosférica. Además, la radiación se verá más o menos atenuada según las condiciones locales de la atmósfera y el ángulo de observación respecto al horizonte. En la Figura 1.1 se pueden ver las ventanas de observación que se tienen desde la Tierra. Tal y como se observa, la atmósfera es prácticamente transparente en el rango óptico y en el rango de ondas de radio.

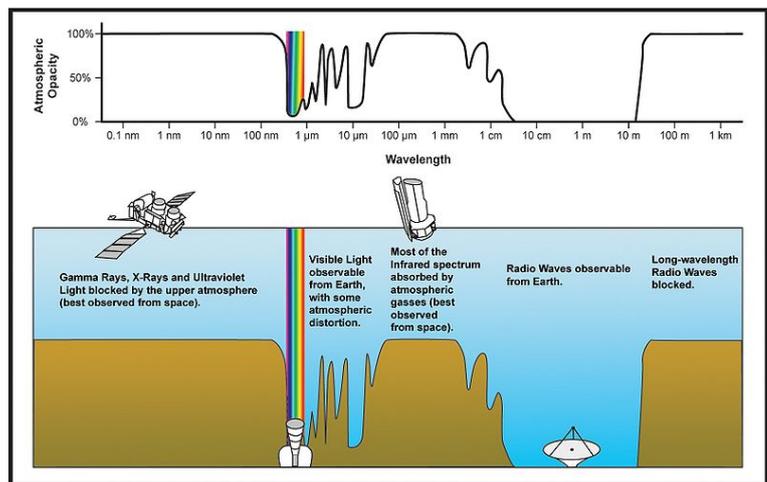


Figura 1.1: Opacidad de la atmósfera terrestre para todo el espectro electromagnético (Knudby).

Además de absorber y dispersar la radiación, la atmósfera presenta turbulencias debido a la variación de temperatura y densidad del aire. Estas turbulencias provocan que la imagen que se crea de una fuente puntual no sea un punto perfecto, sino una imagen ligeramente difuminada y borrosa. Este efecto se conoce como “seeing”. A causa de esta deformación de la imagen por el seeing, es importante tener en cuenta la ubicación de los observatorios. La atmósfera sobre el mar tiende a ser mucho menos turbulenta que la atmósfera sobre la tierra, ya que el mar presenta una superficie esencialmente lisa y de temperatura constante en comparación con la tierra. Por lo tanto, algunos de los mejores sitios astronómicos se encuentran en pequeñas islas en medio de océanos, como es el caso del Observatorio del Teide (“OT”), Tenerife.

El clima de la isla de Tenerife ofrece numerosas noches despejadas al año y una atmósfera muy estable, lo que minimiza la turbulencia atmosférica. Además, el OT está situado a 2.390 metros sobre el nivel del mar, por lo que la capa de atmósfera que se tiene sobre el telescopio es más delgada que la que se tendría a una menor altitud. Esto reduce la extinción atmosférica y mejora el seeing de las observaciones. Asimismo, su localización alejada de núcleos urbanos garantiza una baja contaminación lumínica, lo cual es esencial para la observación de objetos celestes débiles. Por todas estas razones, el OT se considera un lugar privilegiado para la realización de observaciones astronómicas.

Por último, el diseño óptico del telescopio y los instrumentos, también afectan a la cantidad y calidad de la radiación final que recibimos. Entre los distintos factores que influyen en dicha atenuación se encuentra el diseño de los espejos del telescopio, las aberraciones ópticas que se producen, la eficiencia cuántica de los detectores o el ruido que estos generan.

### 1.1.1 Sistemas fotométricos

Los sistemas de medición de radiación electromagnética típicos en el rango de longitudes de onda del visible se componen de distintos elementos. En función de las características de dichos componentes, la radiación incidente será más o menos atenuada.

Un sistema fotométrico se constituye de los siguientes elementos:

- **Recolector de radiación o telescopio:** es el primer elemento con el que se topa la radiación incidente. La luz se recoge por una abertura de diámetro “D”, la cual forma una imagen de las fuentes en lo que se conoce como plano focal. La apertura suele ser una lente o un espejo circular, por lo que la luz que se recoge es proporcional a  $D^2$ . Existen telescopios refractores, reflectores y catadióptricos. Además, estos pueden tener montura ecuatorial o montura alta-azimutal (SEA).
- **Filtros:** Son los componentes ópticos que modifican la distribución espectral de la radiación incidente, dejando pasar un rango determinado de longitudes de onda y bloqueando el resto. El rango del espectro que deja pasar un filtro se conoce como **ancho de banda** y la longitud de onda central del ancho de banda se conoce como **longitud de onda efectiva**. Una de las características ópticas más importante de un filtro es su **transmitancia**. Esta nos indica la fracción de fotones incidentes que se transmiten a través del filtro. En la Figura 1.2(a) se representan de manera esquemática estas características. En la Figura 1.3 se muestran los anchos de banda del sistema de filtros de Johnson-Morgan-Cousins, que son los que se utilizarán en este trabajo y en la Figura 1.2(b) se muestra una fotografía de los filtros UBVRI.

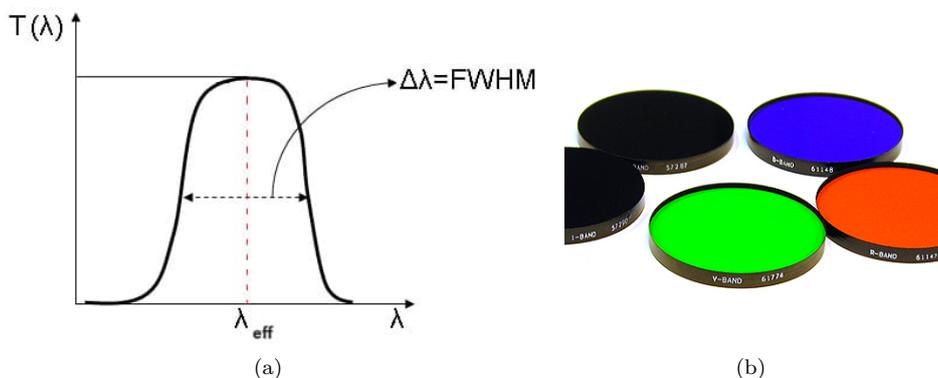


Figura 1.2: A la izquierda: Representación esquemática de la transmitancia en función de la longitud de onda. En negro se indica el ancho de banda y en rojo la longitud de onda efectiva. Nótese que si el filtro tiene un ancho de banda simétrico respecto a la longitud de onda efectiva, esta coincide con la longitud de onda correspondiente a la máxima transmitancia. A la derecha: Fotografía de los filtros UBVRI (Dillhon).

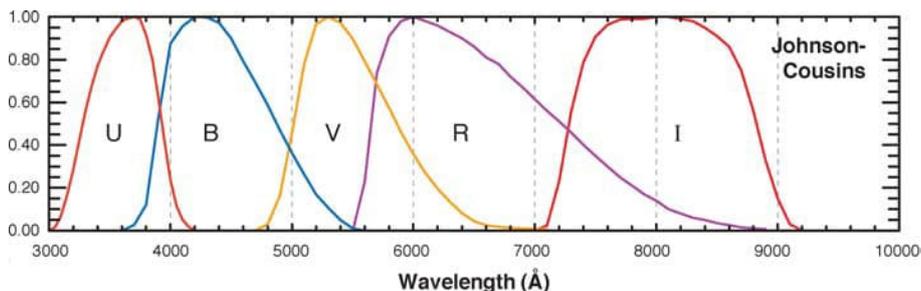


Figura 1.3: Perfiles de los filtros del sistema de Johnson-Morgan-Cousins (Bessell (2005)).

- **Detector:** Es el dispositivo que transforma los fotones incidentes en una señal eléctrica. Existen distintos tipos de detectores según su funcionamiento: fotomultiplicadores, semiconductores...

En la trayectoria del haz, los detectores se sitúan en el plano focal del telescopio. Los más comunes en astronomía son los detectores CCD (“Charge Couple Device”) y los detectores CMOS (“Complementary Metal Oxide Semiconductor”). En la Figura 1.4(a) se muestra una imagen de un detector CCD real.

Los CCD están compuestos de una matriz bidimensional de píxeles y funcionan mediante el uso de semiconductores. El semiconductor más utilizado es el Silicio.

Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico: los fotones incidentes cuya energía es mayor a la energía del gap del semiconductor ( $E = h\nu > 1,26\text{eV}$  en el caso del Silicio) son capaces de excitar a los electrones de la capa de valencia haciendo que pasen a formar parte de la capa de conducción. Una vez que los electrones están en la capa de conducción, estos pueden desplazarse hacia el dispositivo de lectura mediante lo que se conoce como acoplamiento de carga. En la Figura 1.5 se representa de manera esquematizada cómo se lee la cantidad de fotoelectrones producidos.

Conociendo el número de fotoelectrones, es posible conocer la cantidad de fotones incidentes mediante un parámetro que se conoce como **eficiencia cuántica QE**, (“Quantum Efficiency”). Este parámetro indica la fracción de fotones incidentes que producen fotoelectrones.

En cuanto a la electrónica de lectura de un CCD, lo que ocurre es que la carga generada en cada píxel se vacía en un condensador, lo que provoca una diferencia de potencial medible. Este voltaje se transforma mediante un convertidor analógico a digital (ADC) modificando un número de unidades analógicas a digitales (ADU).

Los detectores CCD se caracterizan por su velocidad de lectura, su ganancia y su ruido de lectura. La ganancia,  $G$  [ $e^-/\text{ADU}$ ], es el parámetro que relaciona los electrones generados por los fotones incidentes y el valor numérico que se obtiene en la imagen digital resultante, es decir, determina el número de electrones que generan 1 ADU.

El ruido de lectura se produce por diversos factores: uno de ellos es debido a la dificultad de medir con precisión los voltajes tan pequeños que se generan en el condensador, otro factor que influye es la generación de electrones térmicos debido a altas temperaturas, por lo que es necesario enfriarlos. Además, la velocidad con que se lee el CCD también influye en el ruido: una lectura más rápida aumenta el ruido.

Por último, es importante destacar que cada píxel del CCD tiene una capacidad límite de almacenamiento. Si se supera esa capacidad, la carga de ese píxel se vierte verticalmente en los píxeles adyacentes produciendo lo que se conoce como “blooming” y obteniéndose así una imagen saturada. En la Figura 1.4(b) se muestra un ejemplo de ello.

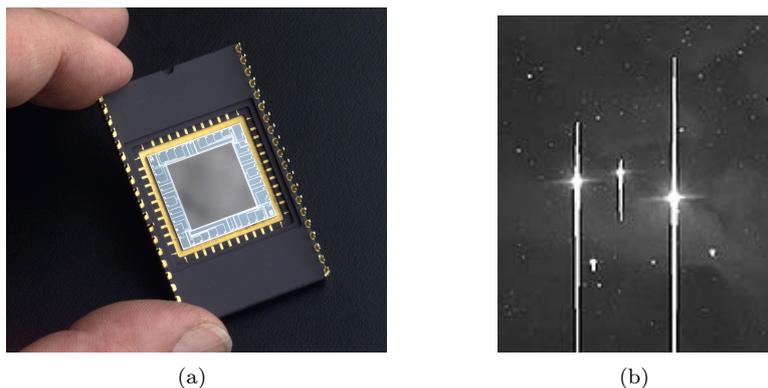


Figura 1.4: A la izquierda: Detector CCD. En la zona central es donde se registran los fotones de la radiación incidente (Dillhon). A la derecha: Blooming producido en una imagen astronómica por exceso de carga en los píxeles (Astronomics).

A diferencia de los CCDs, la lectura de un detector CMOS es mucho más rápida pues la conversión de carga a voltaje se realiza de manera individual en cada píxel y los dispositivos de lectura en cada columna del sensor funcionan simultáneamente. En la Figura 1.5 se muestra de manera esquemática la diferencia de funcionamiento entre un detector CCD y un detector CMOS.

- **Conjunto de estrellas estándares:** a la hora de realizar fotometría es necesario tener un conjunto de

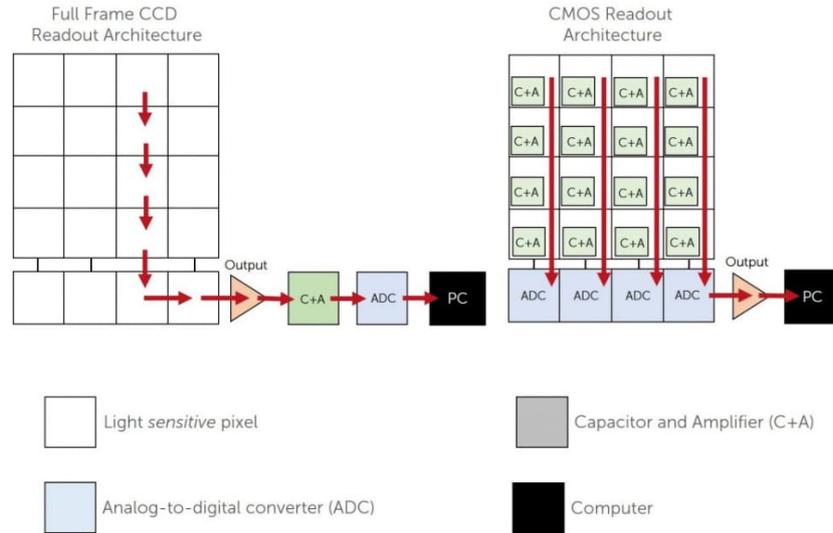


Figura 1.5: Esquema comparativo entre el funcionamiento de un detector CCD (izquierda) y un detector CMOS (derecha) ([Instruments](#)).

estrellas cuyas magnitudes son conocidas tras haber sido medidas con los filtros y el detector que se va a utilizar, para así poder comparar y calibrar las observaciones.

- **Software de reducción de datos:** son aquellos programas que procesan las señales generadas por el detector, eliminan los efectos del ruido y aplican las correcciones necesarias antes de trabajar con las imágenes.

### 1.1.2 Clasificación estelar y escala de magnitudes

En el siglo II a.C., Hiparco de Nicea clasificó las estrellas visibles en seis categorías diferentes en función de su brillo aparente. A las más brillantes les correspondía la clase 1 mientras que las menos brillantes pertenecían a la clase 6. Esta percepción logarítmica del brillo de las estrellas es lo que dio lugar al concepto de magnitud aparente  $m$ .

Los objetos astronómicos, por tanto, vienen determinados según su magnitud aparente. Esta depende de la densidad de flujo del objeto  $F$  y se expresa mediante la ecuación 1.1.

$$m = -2,5 \log_{10} \left( \frac{F}{F_0} \right) + C \tag{1.1}$$

donde  $F_0$  es el flujo que se toma de una estrella de referencia conocida cuya magnitud aparente se define como nula y  $C$  es una constante .

Por lo general a la hora de realizar cualquier medida fotométrica se utiliza el sistema de magnitudes de Vega. En él se establece que las magnitudes de la estrella AV0 Vega en el sistema de filtros Johnson-Morgan-Cousins, también conocido como UBVRI <sup>1</sup>, son cero.

### 1.1.3 Flujo y luminosidad de una estrella

Dada una estrella determinada, se define el flujo de energía de esta como la cantidad de radiación detectada por unidad de área y por unidad de tiempo. Esto no es una propiedad intrínseca de la estrella, ya que depende de la distancia  $d$  a la que se encuentre respecto de la Tierra y de la luminosidad de la estrella  $L$ . En la expresión 1.2 se muestra la relación entre ambas propiedades.

$$F_{\text{obs}} = \frac{L}{4\pi d^2} \text{ [W/m}^2\text{]} \tag{1.2}$$

<sup>1</sup>En el sistema fotométrico UBVRI el filtro “U” cubre la gama ultravioleta, el “B” el azul, “V” cubre el rango óptico o visible y “R” e “I” cubren el rango rojo e infrarrojo respectivamente.

La luminosidad de la estrella es una propiedad intrínseca. Esta puede definirse a partir de la expresión 1.3

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4 \text{ [W]} \quad (1.3)$$

donde  $R$  es el radio estelar,  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^2 \text{ K}^{-4}$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $T_{\text{eff}}$  es la temperatura efectiva en la superficie de la estrella, que se define como aquella que tendría un cuerpo negro que emitiese el mismo flujo total que la estrella.

### 1.1.4 Índice de color

Dadas dos bandas espectrales el color de una estrella se define como la diferencia de magnitud en esas dos bandas, tal y como se muestra a continuación:

$$B - V \equiv m_B - m_V = -2,5 \log_{10} \left( \frac{F_B}{F_V} \right) + C \quad (1.4)$$

## 1.2 Tratamiento de los datos fotométricos

Una vez que se tienen las imágenes astronómicas, es necesario realizar una serie de pasos para poder trabajar con ellas de manera correcta.

### 1.2.1 Magnitudes fotométricas y número de cuentas

Los fotones de la fuente que inciden en el detector CCD de nuestro sistema generan una serie de electrones que se pueden contar. Lo que nos interesa es conocer el número de cuentas que se registran en nuestra imagen astronómica. Este número es directamente proporcional al número de fotones incidentes en el detector ([Dillhon](#)). Suponiendo un sistema de medida con respuesta lineal donde

$$N_\lambda = cte \cdot F_\lambda \quad (1.5)$$

entonces la expresión 1.1 queda de la siguiente forma:

$$m = -2,5 \log_{10} \left( \frac{N}{N_0} \right) + C \quad (1.6)$$

donde  $N$  y  $N_0$  son el número de cuentas en un determinado filtro del objeto astronómico que se está analizando y de la estrella de referencia, respectivamente.

### 1.2.2 Extracción de los datos

#### Fondo de cielo de la imagen

Del mismo modo que la atmósfera absorbe fotones que llegan de los objetos astronómicos, también puede emitirlos en otras direcciones o dispersar radiación proveniente de otras fuentes como la luz de la Luna, del alumbrado público...

Es por ello que en las imágenes que se obtienen con un telescopio todos los píxeles están influenciados por esa radiación externa. De modo que a la hora de trabajar con las imágenes es necesario conocer cuántos fotones de la señal recibida en un píxel provienen de la fuente analizada y cuántos provienen del fondo de cielo ([Dillhon](#)).

#### Extracción

Mediante la técnica de fotometría de apertura, lo que se obtiene es el número de cuentas de la fuente analizada. Para ello se toma una apertura circular o elíptica cuyo centro coincide con el centroide de la fuente, tal y como se representa en las líneas blancas en la Figura 3.8.

La señal total de la estrella será la suma de la señal en cada uno de los píxeles que están en el interior de la apertura definida, menos el valor del fondo de cielo ([Dillhon](#)).

### 1.2.3 Calibración fotométrica

Es importante convertir la señal obtenida a magnitudes en un sistema fotométrico, pues la señal recibida en observatorios diferentes será distinta debido al tipo y tamaño del telescopio utilizado, a los filtros, a las condiciones climáticas...

### Magnitud instrumental

Una vez sustraído el fondo de cielo a nuestra imagen, vamos a llamar  $N_*$  a la señal de la fuente con el fondo sustraído. Tal y como se mencionó en la expresión 1.5 la señal es directamente proporcional al flujo. La magnitud instrumental viene determinada por

$$m_{\text{inst}} = -2,5 \log_{10} \left( \frac{N_*}{t_{\text{exp}}} \right) \quad (1.7)$$

donde  $t_{\text{exp}}$  es el tiempo de exposición de la imagen en segundos.

Teniendo en cuenta la relación lineal entre el número de cuentas y el flujo, la expresión 1.7 queda de la siguiente manera:

$$m_{\text{inst}} = -2,5 \log_{10}(\kappa F_\lambda) + C = -2,5 \log_{10} F_\lambda + C' \quad (1.8)$$

De esta manera, lo que obtenemos es que las magnitudes instrumentales son las magnitudes calibradas más una constante que se conoce como “zeropoint”

$$m_{\text{calib}} = m_{\text{inst}} + m_{\text{zp}} \quad (1.9)$$

Por ejemplo, si la magnitud zeropoint es  $m_{\text{zp}} = 18$ , para una estrella de magnitud  $m_{\text{cali}} = 18$  se detectará 1 fotón/seg en el CCD.

### Extinción atmosférica

Uno de los efectos más importantes que sufre la radiación incidente es la extinción debido a la atmósfera.

Como bien se mencionó en la Sección 1.1, las partículas y moléculas de la atmósfera absorben y dispersan la radiación que nos llega del espacio. Generalmente se debe a las moléculas de vapor de agua y a los aerosoles.

La extinción que sufre la radiación es proporcional al grosor de la capa de la atmósfera que atraviesa, es decir, un objeto observado cerca del cenit será más brillante que cuando se observe cerca del horizonte, pues la capa de atmósfera que atraviesa cuando está en el cenit es menor.

Por este motivo, a la hora de calcular las magnitudes instrumentales de los objetos astronómicos, es necesario corregir este efecto. Realizando esta corrección se tendrá la magnitud instrumental que se obtendría fuera de la atmósfera.

Supongamos que la atmósfera es un conjunto de capas delgadas plano-paralelas y consideremos una capa de espesor  $dx$  a una altitud  $x$ . Para una estrella situada en el cenit la radiación recorre una distancia  $dx$ ; sin embargo, para una estrella situada a un ángulo  $z$  su radiación recorre una distancia igual a  $dx \cdot \sec(z)$ , tal y como se representa en la Figura 1.6.

Al término  $\sec(z) = X$  se le denomina masa de aire. El flujo de la estrella se ve atenuado mediante la expresión

$$dF_\lambda = -\alpha_\lambda F_\lambda \sec(z) dx \quad (1.10)$$

donde  $\alpha_\lambda$  es el coeficiente de absorción.

Integrando la expresión 1.10 en todo el grosor de la capa de la atmósfera y desarrollando las expresiones obtenemos:

$$\int_t^b \frac{dF}{F} = -\sec(z) \int_t^b \alpha dx \Rightarrow \frac{F_b}{F_t} = \frac{F}{F_0} = \exp \left( -\sec(z) \int_t^b \alpha dx \right) \quad (1.11)$$

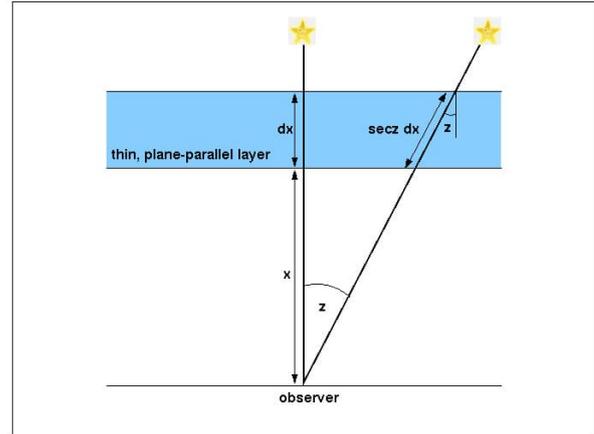


Figura 1.6: Esquema de una capa delgada plano-paralela de la atmósfera terrestre. En él se representa el camino que atraviesa la radiación que proviene de dos estrellas, una situada en el cenit y otra situada a un ángulo cenital  $z$  (Dillhon).

donde  $F_0$  es el flujo sobre la atmósfera y  $F$  el flujo medido en el observatorio. Teniendo en cuenta la expresión 1.1, se tiene

$$m - m_0 = -2,5 \log_{10} \left( \frac{F}{F_0} \right) = 2,5 \sec(z) \log_{10}(e) \int_t^b \alpha dx \quad (1.12)$$

donde podemos definir el coeficiente de extinción como

$$k = 2,5 \log_{10}(e) \int_t^b \alpha dx \quad (1.13)$$

Por lo tanto, se obtiene finalmente

$$m = m_0 + k \sec(z) = m_0 + k X \quad (1.14)$$

siendo  $m_0$  la magnitud instrumental del objeto fuera de la atmósfera y  $m$  la magnitud instrumental observada desde la superficie terrestre afectada por la extinción atmosférica.

### Magnitud calibrada

Conociendo cómo afecta la extinción atmosférica a las magnitudes podemos obtener la magnitud instrumental de cualquier objeto sobre la atmósfera.

Como último paso, debemos calibrar esa magnitud con ayuda de las estrellas estándares (Dillon). Supongamos conocida la magnitud instrumental de una estrella estándar,  $m_{\text{std,inst}}$ , y supongamos que conocemos el coeficiente de extinción de la noche de observación,  $k$ . La magnitud instrumental de la estrella estándar sobre la atmósfera vendrá dada por

$$m_{\text{std,0,inst}} = m_{\text{std,inst}} - k X \quad (1.15)$$

Además, teniendo en cuenta la expresión 1.9, la magnitud  $m_{\text{zp}}$  queda de la forma

$$m_{\text{zp}} = m_{\text{std}} - m_{\text{std,0,inst}} = m_{\text{std}} - m_{\text{std,inst}} + k X \quad (1.16)$$

donde  $m_{\text{std}}$  es la magnitud calibrada de la estrella estándar que se recoge en los catálogos.

Por lo tanto, la magnitud calibrada de nuestro objeto vendrá dada por la siguiente expresión:

$$m = m_{\text{zp}} + m_{0,\text{inst}} = m_{\text{zp}} + m_{\text{inst}} - k X \quad (1.17)$$

siendo  $m_{0,\text{inst}}$  la magnitud instrumental del objeto sobre la atmósfera terrestre.

### Término de color

La respuesta que se obtiene mediante un sistema de medida difiere ligeramente respecto a la que se obtiene con otro sistema en otro observatorio y respecto a la que se empleó para definir las magnitudes de las estrellas estándar. Esta diferencia en la magnitud depende del color de los objetos. Por lo tanto, es necesario considerar lo que se conoce como término de color  $C$ , tal y como se muestra en la ecuación 1.18.

$$m_{\text{std}} - m_{\text{std,0,inst}} - m_{\text{zp}} = C \quad (1.18)$$

Este término nos permite obtener precisiones en las magnitudes del orden de 0.01 mag y se emplea a la hora de realizar fotometría diferencial.

## 1.3 Relación Señal-Ruido

La relación señal-ruido (S/N o SNR) es uno de los parámetros más importantes a la hora de evaluar la calidad de las medidas fotométricas.

Las fuentes de ruido en una observación astronómica con CCD son las siguientes:

- Ruido generado por los fotoelectrones detectados,  $\sqrt{S_*}$
- Ruido generado por los electrones del fondo de cielo,  $\sqrt{S_{\text{sky}}}$
- Ruido generado por la corriente de oscuridad,  $\sqrt{S_{\text{dark}}}$

- Ruido de lectura,  $R$

Teniendo en cuenta que todas las fuentes de ruido son independientes, podemos expresar el ruido total de la siguiente manera:

$$N = \sqrt{S_* + S_{\text{sky}} + S_{\text{dark}} + R^2} \quad (1.19)$$

Por lo tanto, la relación señal-ruido conocida como “Ecuación de la CCD” se expresa como:

$$SNR = \frac{S_*}{N} = \frac{S_*}{\sqrt{S_* + S_{\text{sky}} + S_{\text{dark}} + R^2}} \quad (1.20)$$

donde

- $S_*$  es el número total de fotones incidentes de un determinado objeto astronómico por unidad de tiempo.
- $S_{\text{sky}}$  es el número de fotones del fondo de cielo por unidad de tiempo.
- $S_{\text{dark}}$  es el número de electrones de corriente oscura por unidad de tiempo.
- $R$  es el número de electrones resultantes del ruido de lectura.

Por lo general, cuando trabajamos con imágenes obtenidas con una CCD, el número de fotones de la fuente y del cielo viene dado en número de cuentas ADU. Para poder calcular la relación SNR en unidades físicas es necesario transformar estas variables a unidades de electrones, por lo que la ecuación 1.20 queda de la forma

$$SNR = \frac{S_*}{N} = \frac{S_* G t_{\text{exp}}}{\sqrt{S_* G t_{\text{exp}} + n_{\text{pix}}(S_{\text{sky}} G t_{\text{exp}} + S_{\text{dark}} t_{\text{exp}} + R^2)}} \quad (1.21)$$

donde

- $G$  es la ganancia del detector CCD, expresada en unidades de  $[e^-/\text{ADU}]$ .
- $t_{\text{exp}}$  es el tiempo de exposición, expresado en  $[\text{s}]$ .
- $n_{\text{pix}}$  es el número de píxeles de la CCD sobre el que se distribuyen los fotones incidentes de la fuente.

## 1.4 Observatorio del Teide



Figura 1.7: Fotografía panorámica del Observatorio del Teide (IAC (e)). Crédito Daniel López.

El Observatorio del Teide (OT), situado en el macizo de Izaña (Tenerife) a 2390 m de altitud, pertenece al Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Fue inaugurado oficialmente en el año 1985 y ha jugado un papel muy importante en la astrofísica a lo largo de los años.

Alberga en sus instalaciones todo tipo de excelentes telescopios e instrumentos profesionales (de tipo nocturno, robóticos, con control remoto...) como por ejemplo el telescopio Carlos Sánchez, SPECULOOS, IAC80 o el experimento QUIJOTE. Pero la ubicación geográfica privilegiada junto con la extraordinaria calidad del cielo, han favorecido la especialización en el estudio del Sol. Gracias a esto, el OT incluye algunos de los mejores telescopios solares de Europa (IAC (e)), como el telescopio GREGOR de 1,5m, el VTT (“Vacuum Tower Telescope”) de 60 cm o el telescopio THEMIS (“Télescope Heliografic pour l’Étude du Magnétisme et de l’Instabilité Solaire”) de 90 cm.

Entre las diferentes áreas de investigación se pueden destacar los estudios realizados sobre la luz zodiacal, el nacimiento de la Heliosismología, las distintas mediciones de la radiación del fondo cósmico de microondas, el seguimiento de cometas como P/Shoemaker-Levy y su choque con Júpiter, la obtención del mapa a gran escala del centro de la Vía Láctea o el estudio de tránsitos de planetas extrasolares, entre otros (IAC (e)).

### 1.4.1 Telescopio IAC 80

El Telescopio IAC80 fue el primer telescopio diseñado y construido íntegramente por el Instituto de Astrofísica de Canarias para realizar observaciones en el rango óptico (IAC (d)). Se trata de un telescopio de montura ecuatorial alemana cuya instrumentación se encuentra en su foco principal Cassegrain. Se compone de un espejo principal de 82 cm de diámetro y tiene una relación focal<sup>2</sup> de  $f/11.3$ , es decir, la distancia focal es de 9.02 m. El IAC80 es ideal para programas de larga duración, para realizar

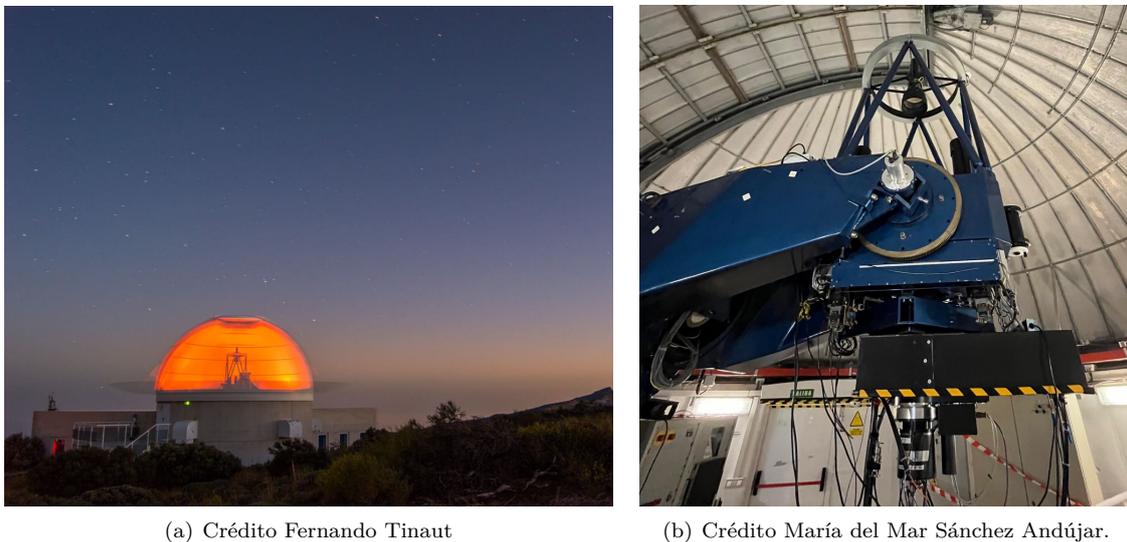


Figura 1.8: Fotografía del exterior (a) y del interior (b) del telescopio IAC80.

colaboraciones con otros telescopios así como para realizar prácticas de estudiantes y pruebas observacionales o instrumentales.

### 1.4.2 Instrumentos

Los instrumentos disponibles en el IAC80 han ido variando a lo largo del tiempo. Actualmente cuenta con dos cámaras disponibles: CAMELOT2 y CARONTE. En la Figura 1.9 se muestra una fotografía de ambos instrumentos.

#### CAMELOT2

La cámara CAMELOT2 (“CAmara MEjorada Ligera del Observatorio del Teide”) se instaló en el IAC80 en el año 2019 para sustituir a su precursora CAMELOT. Fue diseñada por Spectral Instrument (IAC (a)). Se trata de una cámara CCD (“Charge Couple Device”) retroiluminada de 4kx4k que opera en el rango de longitud de onda óptica. Sus características principales se muestran en la Tabla 1.1.

Tamaño total del CCD	4096 (horizontal) x 4112 (vertical) píxeles
Tamaño del píxel	15 x 15 $\mu\text{m}$
Escala de placa	0,322"/píxel
Campo CCD total	21.98 x 22.06 arcmin <sup>2</sup>
Tamaño útil del CCD cuadrado	2200 (horizontal) x 2200 (vertical) píxeles
Campo útil del CCD cuadrado	11.8 x 11.8 arcmin <sup>2</sup>
Campo útil del CCD circular	diámetro de 16.7 arcmin
Modos de lectura	15

Tabla 1.1: Características principales de la cámara CAMELOT2 (IAC (a)).

<sup>2</sup>En óptica, la relación focal se define como la relación entre la distancia focal del telescopio y el diámetro del mismo, es decir,  $f/N \Rightarrow f/D = N$ , siendo  $f$  la distancia focal y  $D$  el diámetro del telescopio (Casas Peláez (2008)).

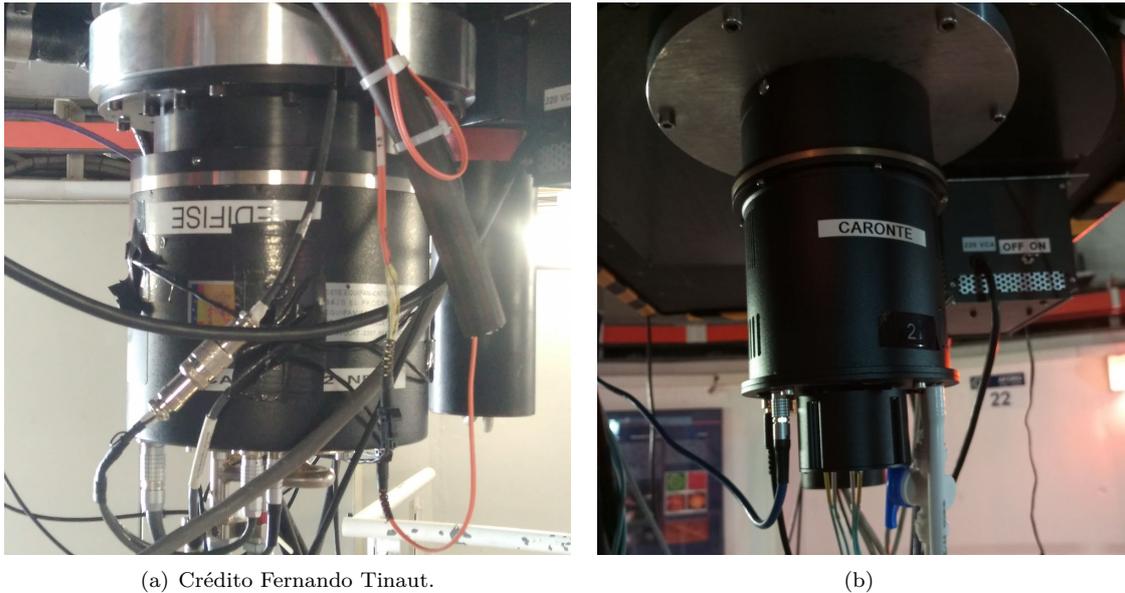


Figura 1.9: Fotografía de CAMELOT2 (a) y CARONTE (b) conectadas al IAC80.

### CARONTE

La cámara CARONTE (“Cámara de **A**lta resolución súper **R**ápida del **O**bservatorio Nocturno del **T**eide”) es un instrumento que se tiene como alternativa a CAMELOT2 desde finales de 2022. Se trata de una cámara con sensor de tipo CMOS fabricado por QHYCCD. Consiste en un CCD retroiluminado de 11kx8k que opera en el rango de longitud de onda óptica (IAC (b)). En la Tabla 1.2 se recogen sus características principales.

Tamaño total del CCD	11656 (horizontal) x 8742 (vertical) píxeles
Tamaño del píxel	3.76 x 3.76 $\mu\text{m}$
Escala de placa	0,0811"/píxel (Binning 1x1)
Binning	1x1, 2x2, 4x4
Campo CCD total	16 x 12 arcmin <sup>2</sup>
Modos de lectura	1

Tabla 1.2: Características principales de la cámara CARONTE (IAC (b)).

# Capítulo 2

## Objetivos

La calidad de una medida obtenida a partir de una imagen astronómica viene cuantificada por la relación señal-ruido. Una herramienta muy útil para los astrónomos a la hora de realizar observaciones es la calculadora de tiempo de exposición (ETC, de sus siglas “Exposure Time Calculator”). Esta determina el tiempo de exposición necesario para que la señal recibida de un objeto de magnitud  $m$  sea la indicada.

La ETC depende de diferentes factores entre los que destacan las características técnicas de los componentes del sistema fotométrico, tal y como se explicará en la Sección 3.1.1. Estos componentes pueden deteriorarse con el paso del tiempo, lo que implica una disminución de la señal recibida de los objetos.

Recientemente se han caracterizado los filtros disponibles para el IAC80 y se han aluminizado sus espejos, por lo que las características técnicas del telescopio y por tanto los resultados obtenidos con él, se han visto modificados.

Por este motivo, resulta necesario actualizar la calculadora de tiempo de exposición de CAMELOT2.

Por otro lado, la cámara que se tiene operativa actualmente en el IAC80 es CARONTE. Sin embargo, dado que es un instrumento nuevo, no dispone de una calculadora de tiempo de exposición, lo que dificulta y aumenta el tiempo requerido en la realización de observaciones.

El objetivo de este trabajo consiste en actualizar la calculadora de tiempo de exposición para CAMELOT2 y en desarrollar una nueva calculadora para la cámara CARONTE.

La ETC existente para CAMELOT2 está diseñada en base a la calculadora del Isaac Newton Group of Telescopes (ING), situado en el observatorio del Roque de Los Muchachos (La Palma). En este trabajo se han realizado las modificaciones necesarias para ajustar cada uno de los parámetros a los instrumentos del IAC80.

Para ello, ha sido necesario realizar un análisis exhaustivo de cada uno de los parámetros y funciones desarrolladas en el código del ING, así como de los parámetros y funciones definidas en el código existente de la calculadora de CAMELOT2.

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de la ETC para cada una de las cámaras, se ha desarrollado un programa que, a partir de una imagen astronómica y las coordenadas de una fuente, obtiene la información de la cabecera de la imagen necesaria para introducir en la web, calcula el fondo de cielo, el flujo de la fuente y el pico de la señal, así como el valor de la relación SNR.

Además, el programa obtiene el valor de la magnitud aparente de la fuente correspondiente a partir de la información recogida en un catálogo de estrellas estándares proporcionado por el observador Manuel Sánchez Benavente.

# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo se explica el proceso y método utilizado en este trabajo. En la Sección 3.1 se realiza un análisis detallado de los parámetros y funciones descritas en el código actual de la calculadora de tiempo de exposición de CAMELOT2, así como de las funciones definidas en el código existente de la calculadora del ING. En la Sección 3.2 se especifican los datos utilizados para la comprobación del correcto funcionamiento de las ETC. A continuación, en la Sección 3.3 se describe el procedimiento y los valores resultantes para cada uno de los parámetros que se deben introducir en la interfaz de la calculadora, así como los valores del número de cuentas del objeto, del fondo de cielo, del pico del objeto y de la SNR obtenidos con las imágenes disponibles. Finalmente, en la Sección 3.4 se explica cómo ha sido posible verificar si los resultados obtenidos experimentalmente coinciden con los valores que resultan de emplear la calculadora.

### 3.1 Análisis teórico

El primer paso para la elaboración de este trabajo ha sido comprender el funcionamiento de la calculadora de tiempo de exposición existente, así como todas las variables que influyen en el resultado.

#### 3.1.1 Exposure Time Calculator

La calculadora de tiempo de exposición, diseñada en PHP<sup>1</sup>, calcula el tiempo de exposición o el valor de la relación señal-ruido (SNR) en función de diferentes parámetros relacionados con el instrumento, el objeto a analizar y la calidad de la noche de observación. Estos parámetros, que se ingresan mediante un formulario HTML, son los siguientes: el filtro utilizado, el modo de lectura, el valor del tiempo de exposición si lo que se pretende conocer es la SNR o viceversa, el tipo de objeto si es puntual o extendido y su magnitud aparente, el brillo del cielo, la masa de aire, el valor del seeing de la noche y de la extinción atmosférica. Cada uno de estos parámetros se analiza detalladamente más adelante en la Subsección “[Variables introducidas por el usuario](#)”.

Cuando se envía el formulario, el script lee la información proporcionada por el usuario así como la solicitud del cálculo de tiempo de exposición o de relación señal-ruido y realiza los cálculos necesarios, presentando los resultados en forma de gráfica y de tabla, tal y como se muestra en la Figura 3.1.

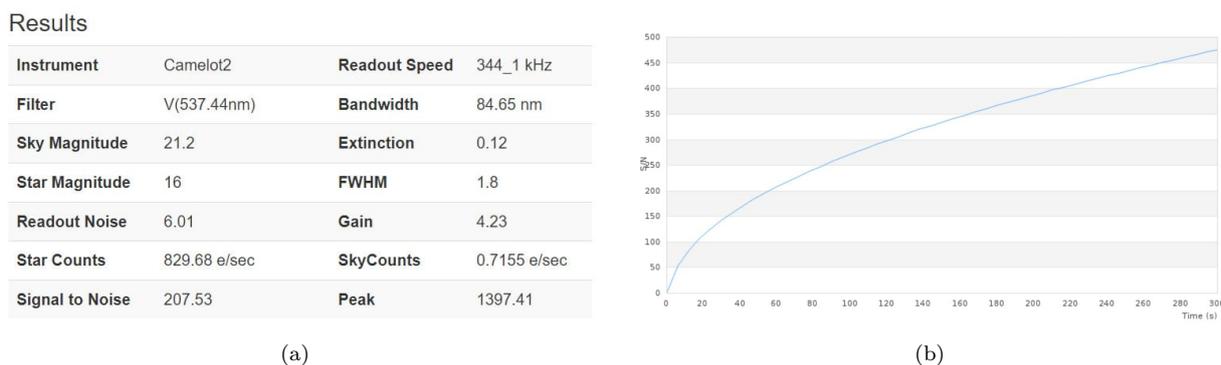


Figura 3.1: Resultados obtenidos de la ETC en forma de tabla (a) y de gráfica (b).

Los archivos que contiene el código de la ETC son los siguientes:

- “Data.php”, en él se definen los datos específicos de los filtros, del detector, del telescopio...
- “functions.php”, en él se definen todas las funciones para realizar los cálculos necesarios para determinar el tiempo de exposición o la SNR.

<sup>1</sup>“Hypertext Pre-Processor”, es un lenguaje de programación ampliamente utilizado en el desarrollo de páginas web.

- “index.php”, es la función principal. En este archivo se definen las acciones principales del programa, llamando a las funciones y parámetros definidos en los otros.
- “graph.php”, en él se establece el modo de representar gráficamente los resultados obtenidos.

A continuación se detalla más en profundidad cada uno de los parámetros y funciones definidas.

### Definición y obtención de parámetros

Los parámetros definidos en el archivo “Data.php” están relacionados con las características específicas de los filtros disponibles para la cámara CAMELOT2, las características del detector CCD y del telescopio IAC80. A continuación se especifican todos aquellos parámetros definidos en el código y los valores que se han obtenido para actualizarlos en caso de que sea necesario.

- **Filtros**

Los filtros más utilizados para la cámara CAMELOT2 en el telescopio IAC80 son los correspondientes al sistema de Johnson-Morgan-Cousins (U, B, V, R e I). Además también se utilizan filtros estrechos correspondientes al sistema SSDS (Sloan Digital Sky Survey) (u’, g’, r’, i’ y z’).

En este proyecto únicamente se ha trabajado con los filtros de Johnson, pues las imágenes utilizadas se tomaron con ellos. Conociendo las características del resto de filtros, se puede afirmar que si la ETC funciona correctamente para los filtros Johnson, también lo hará para los filtros SSDS.

- **Longitud de onda central** (parámetro 1): También conocida como longitud de onda efectiva. Para calcular su valor, se dispone de un conjunto de datos de la transmitancia de cada uno de los filtros Johnson para longitudes de onda comprendidas entre 280 nm y 1200 nm. Estos datos han sido proporcionados por el investigador del IAC David Nespral. En la Figura 3.2 se representa la transmitancia de los filtros frente a la longitud de onda. Tal y como se indica en los gráficos, la línea discontinua azul marca la longitud de onda central. En la Tabla 3.1 se recogen en la segunda columna los resultados obtenidos del valor de longitud de onda central para cada uno de los filtros Johnson.
- **Ancho de banda** (parámetro 2): viene determinado por la FWHM, es decir, es el rango espectral entre las longitudes de onda correspondientes a la mitad de la transmisión máxima. En la Figura 3.2 se representa la FWHM con una línea discontinua roja. Para calcularla se ha desarrollado un programa que encuentra los valores de las longitudes de onda correspondientes al 50 % de la transmitancia máxima y realiza la diferencia entre ellas:

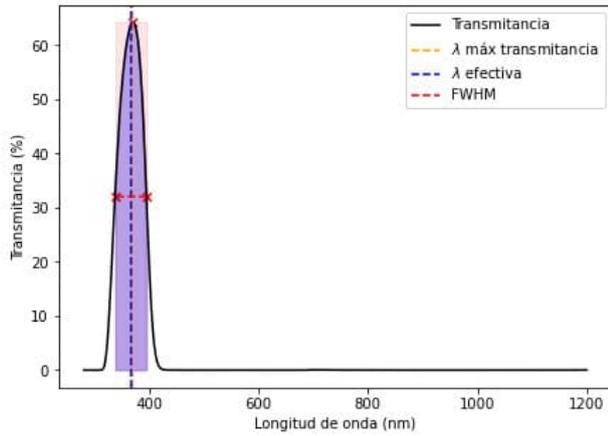
$$\Delta\lambda_1 = \lambda_{50,2} - \lambda_{50,1} \quad (3.1)$$

Teóricamente el ancho de banda se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

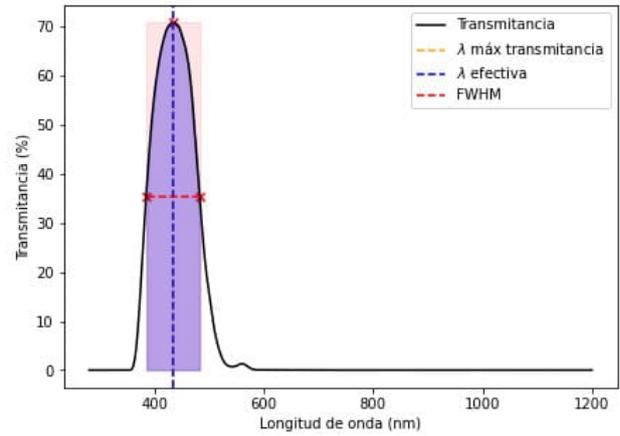
$$\Delta\lambda_2 = \int T(\lambda) d\lambda \quad (3.2)$$

Sin embargo, los resultados obtenidos con uno y otro método difieren ligeramente tal y como se recoge en la Tabla 3.1, por lo que se ha decidido introducir en el archivo “Data.php” los valores resultantes de realizar la diferencia entre las longitudes de onda a mitad de altura, ya que se aproximan más a los valores tabulados en (Dillhon) y los que aparecen en la calculadora de tiempo de exposición del ING (Chris Benn, Robert Greimel, Javier Méndez).

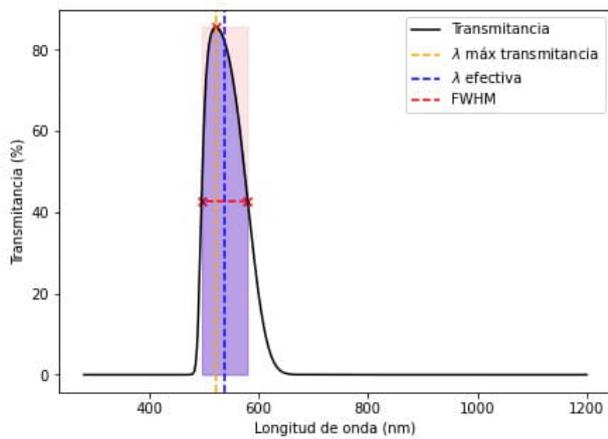
- **Transmitancia y eficiencia** (parámetro 4): La **transmitancia** es la fracción de radiación que pasa a través de un filtro. Cuando se hace referencia a la transmitancia de un filtro, se está considerando el valor máximo de su curva de transmisión. A partir de los datos proporcionados por el investigador David Nespral, se ha podido obtener la transmitancia de cada uno de los filtros. La **eficiencia** de un filtro indica cómo de bien se transmite la radiación en el rango espectral del ancho de banda del filtro. Un filtro cuya eficiencia sea del 100 % significa que la curva de transmitancia en el rango espectral de su ancho de banda es una función cuadrada. Para obtener los valores de eficiencia se ha calculado la fracción del área bajo la curva de transmitancia real con respecto al área del rectángulo formado por el ancho de banda y la transmitancia máxima de cada filtro. En la Figura 3.2 el área en color violeta bajo las curvas de transmitancia corresponde a la eficiencia del filtro, mientras que el área del rectángulo rojo equivale a eficiencias del 100 %. Ambas propiedades se han tenido en cuenta a la hora de calcular los valores correspondientes a este parámetro para cada uno de los filtros. En la Tabla 3.1 se recogen los valores obtenidos de transmitancia y eficiencia, así como el producto de ambos que determina el valor del parámetro 4 en el archivo “Data.php”.



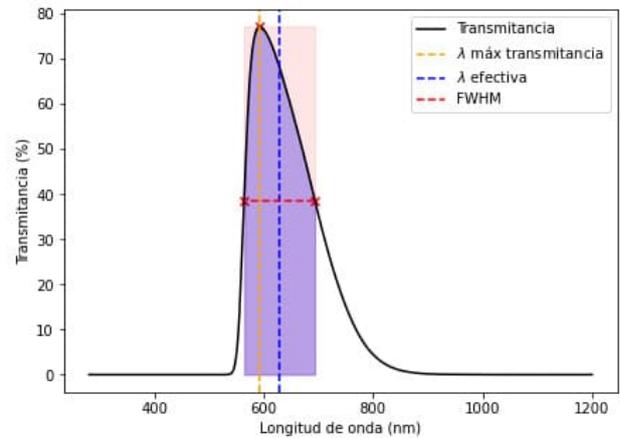
(a) Transmitancia para el filtro Johnson U.



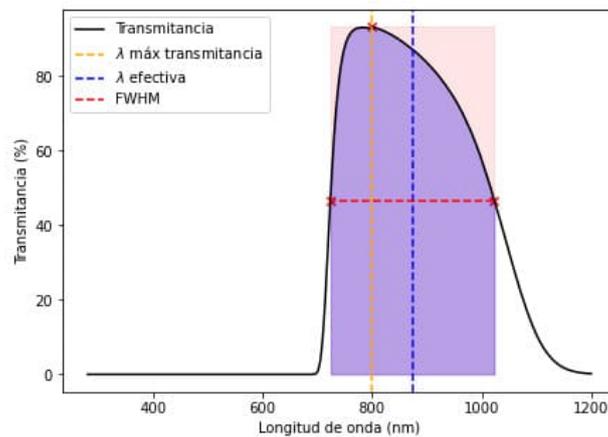
(b) Transmitancia para el filtro Johnson B.



(c) Transmitancia para el filtro Johnson V.



(d) Transmitancia para el filtro Johnson R.



(e) Transmitancia para el filtro Johnson I.

Figura 3.2: Transmitancia de los filtros Johnson U, B, V, R e I en función de la longitud de onda. En negro se representa la transmitancia, la línea discontinua naranja marca el máximo de la transmitancia, la línea discontinua roja indica la FWHM o ancho de banda y la línea discontinua azul marca la longitud de onda efectiva, determinada por la mitad del ancho de banda. El área coloreada en violeta indica la eficiencia de los filtros, mientras que el área de los rectángulos en color rojo correspondería a una eficiencia del 100 % en cada uno de ellos.

- **Truethrough** (parámetro 9): Este último parámetro es un factor de corrección entre el resultado teórico de la magnitud zeropoint que se obtiene con la calculadora y el resultado experimental que

Filtro	$\lambda_{\text{central}}$ [nm]	$\Delta\lambda_1$ [nm]	$\Delta\lambda_2$ [nm]	Transmitancia	Eficiencia	Parámetro 4
U	365.57	57.60	36.29	0.64	0.84	0.54
B	433.15	98.17	69.44	0.71	0.86	0.612
V	537.44	84.65	72.38	0.86	0.85	0.731
R	628.30	129.64	103.96	0.77	0.81	0.624
I	873.18	299.95	268.21	0.93	0.86	0.8

Tabla 3.1: Valores de la longitud de onda central, del ancho de banda, de la transmitancia, de la eficiencia de los filtros Johnson. En la tercera y cuarta columna se muestran los resultados obtenidos al calcular el ancho de banda de dos maneras diferentes: la primera,  $\Delta\lambda_1$ , como la diferencia entre las longitudes de onda correspondientes a la mitad de la transmitancia máxima (expresión 3.1) y la segunda,  $\Delta\lambda_2$ , como la integral de la transmitancia (expresión 3.2).

se obtiene al aplicar fotometría en las imágenes. Su valor oscila entorno a valores cercanos entre 0.7 y 1.1 (Chris Benn, Robert Greimel, Javier Méndez) y varía según el filtro y según el instrumento. A partir del ajuste realizado por el investigador Manuel Sánchez Benavente, se ha obtenido el valor experimental. El método que sigue consiste en realizar un ajuste de la ecuación 1.18, de modo que conociendo la magnitud estándar, la magnitud instrumental, la masa de aire, el coeficiente de extinción y el color, se obtiene la magnitud zeropoint.

Por otro lado, el valor teórico se puede calcular despejando la variable *mag* de la expresión 3.3.

Los valores obtenidos de este factor de corrección para CAMELOT2 son: 0.92 para los filtros U y B, 0.93 para el filtro V, 0.94 para el filtro R y 0.95 para el I. Se ha comprobado de manera empírica que si se ajustan aún más estos valores la correlación entre resultados experimentales y teóricos es más exacta. En la Tabla 3.2 se recogen los valores finales para cada cámara.

	U	B	V	R	I
CAMELOT 2	1.1	0.75	0.76	0.89	1.2
CARONTE	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7

Tabla 3.2: Valores del parámetro Truethrough para cada uno de los filtros y para cada una de las cámaras.

- **Flujo de la estrella de referencia** (parámetro 3)

Para poder calibrar los resultados obtenidos es necesario conocer el flujo de una estrella de referencia para cada banda espectral. Se desconocía el origen de los valores previos definidos en el archivo “Data.php”. Para obtenerlos se han consultado diferentes fuentes y se ha comprobado que la estrella de referencia que se emplea es la estrella Vega. Los valores que se toman son los que se recogen en Bessell (1979). En la Tabla 3.3 se muestran los valores introducidos en el código como flujo de la estrella de referencia.

Filtro	U	B	V	R	I
Flujo Vega [Jy]	1810	4260	3640	3080	2550

Tabla 3.3: Valores del flujo de Vega para cada uno de los filtros de Johnson.

- **Brillo del cielo** (parámetros 6, 7 y 8)

La magnitud del cielo influye en los resultados de las observaciones, por lo que es importante tener en cuenta si la noche es oscura, gris o brillante.

El mayor efecto proviene de la luz de la Luna: se considera que la noche es oscura si hay Luna nueva, noche gris si se tiene Luna creciente o está justo en la fase de cuarto creciente o menguante y se considera noche brillante si se tiene Luna gibosa o Luna llena. Dependiendo de la fase de la Luna, el brillo del cielo en los diferentes filtros se ve modificado (Chris R. Benn, Sara L. Ellison (a)) (Chris R. Benn, Sara L. Ellison (b)). Otros factores importantes que influyen en el brillo del cielo son el brillo de fondo, también conocido como airglow, la luz zodiacal, las condiciones atmosféricas y la posición galáctica y eclíptica de la fuente objetivo, así como el ciclo solar. Según se menciona en (Chris R. Benn, Sara L. Ellison (a)) y (Chris R. Benn, Sara L. Ellison (b)) los valores medidos en el ORM (La Palma) son muy similares a otros sitios oscuros como lo es el Observatorio del Teide, Chile o Hawaii.

Se ha de considerar que las medidas que se tienen para el ORM en La Palma y que se recogen en Alarcon et al. (2021) para el OT en Tenerife, se realizaron en el año 1987 y 2018, respectivamente, donde el ciclo solar era mínimo (Chris R. Benn, Sara L. Ellison (a)), (Alarcon et al. (2021)), tal y como se muestra en la

Figura 3.3. Actualmente nos encontramos en un máximo del ciclo solar ([SpaceWeatherLive](#)), lo que implica que el cielo es 0.5 mag más brillante ([Chris R. Benn, Sara L. Ellison \(a\)](#)), por lo que hay que tener este dato en cuenta a la hora de analizar los resultados obtenidos.

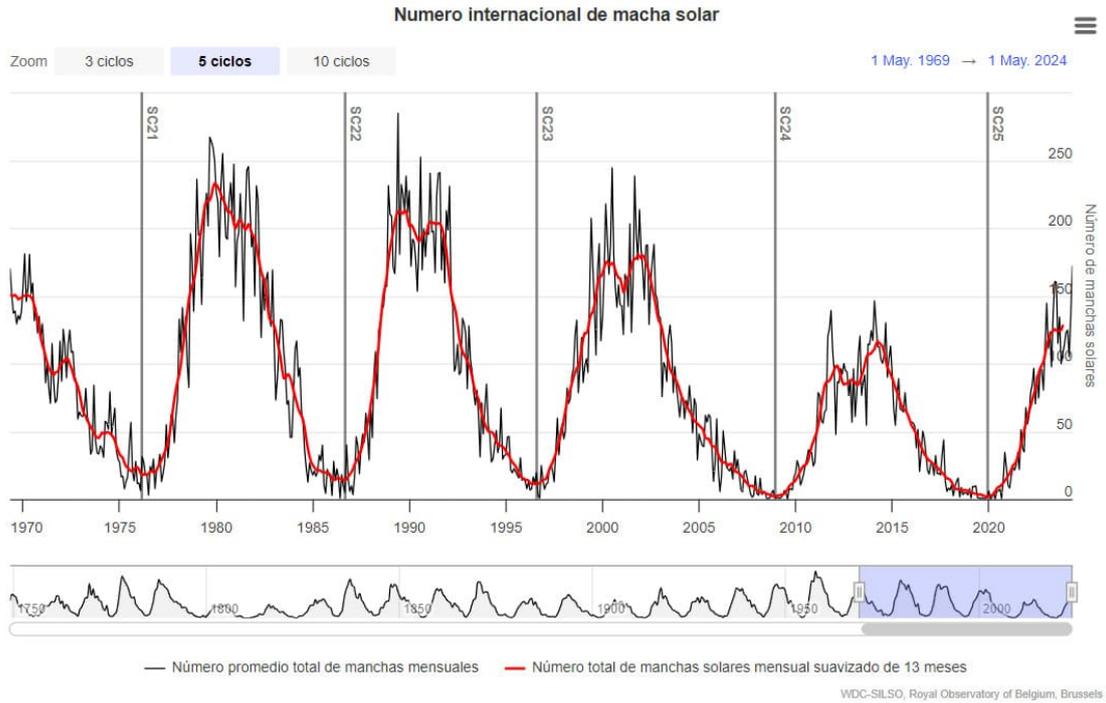


Figura 3.3: Variación del ciclo solar desde el 1 de mayo de 1969 hasta el 1 de mayo de 2024 ([SpaceWeatherLive](#)).

En la Tabla 3.4 se muestran los valores de la magnitud del cielo para cada tipo de noche introducidos en la calculadora.

Filtro	$m_{\text{dark}}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	$m_{\text{grey}}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	$m_{\text{bright}}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]
U	22	19.9	17
B	22.05	21.6	19.5
V	21.2	21.4	20
R	20.72	20.6	19.9
I	19.9	19.7	19.2

Tabla 3.4: Valores de la magnitud del cielo para cada uno de los filtros Jonhson para noches oscuras, grises y brillantes ([Chris R. Benn, Sara L. Ellison \(a\)](#)), ([Alarcon et al. \(2021\)](#)).

• **Detector**

En el archivo “Data.php” también se definen características de los detectores como la ganancia, el ruido de lectura, la eficiencia cuántica, los modos de lectura que tiene o la escala de placa. A continuación se definen cada uno de los parámetros para los detectores tanto de la cámara CAMELOT2 como de la cámara CARONTE.

- **Eficiencia cuántica** (parámetro 5): Este parámetro determina la fracción de fotones que generan fotoelectrones. En la página web del IAC, donde se especifica las características de cada cámara, podemos encontrar las gráficas de la eficiencia cuántica de CAMELOT2 y de CARONTE. En las Figuras 3.4 y 3.5 se representan dichas gráficas.

Dado que no disponemos de los datos que se midieron para realizar esas gráficas y así conocer cuál es el valor de la eficiencia cuántica para la longitud de onda central de cada banda, se ha hecho uso de la web <https://plotdigitizer.com/app> que nos permite obtener los datos a partir de una imagen. Una vez obtenidos dichos valores, se ha realizado un script en python para conocer la eficiencia cuántica correspondiente a las longitudes de onda efectivas de los filtros Johnson. En la Tabla 3.5 se recogen los resultados obtenidos.



Figura 3.4: Eficiencia cuántica para CAMELOT2 (IAC (f)).

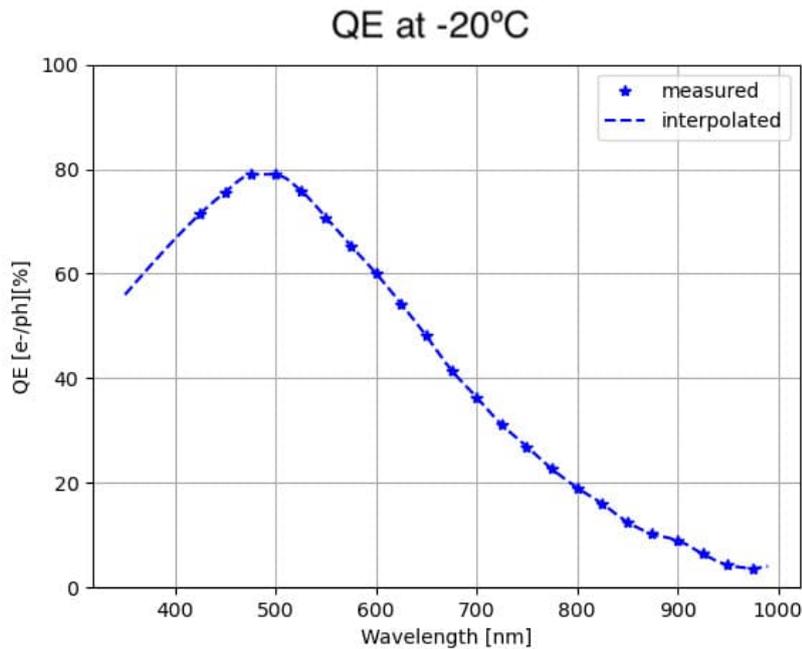


Figura 3.5: Eficiencia cuántica para CARONTE (IAC (g)).

Filtro	$\lambda_{\text{central}}$ [nm]	$QE_{\text{CAMELOT2}}$ [ $e^-/\gamma$ ][%]	$QE_{\text{CARONTE}}$ [ $e^-/\gamma$ ][%]
U	365.57	23.5	63.5
B	433.15	66.3	75.8
V	537.44	92.5	71.0
R	628.30	92.3	53.6
I	873.18	36.9	10.3

Tabla 3.5: Valores de la eficiencia cuántica de cada uno de los filtros para las cámaras CAMELOT2 y CARONTE.

- **Ganancia y ruido de lectura:** La ganancia y el ruido de lectura dependen del modo de lectura del detector. Los valores para cada una de las cámaras se han caracterizado por el grupo de operaciones telescópicas y se muestran en la Tabla 3.6 (IAC (a)), (IAC (b)).

En el caso de CAMELOT2 se tienen 3 modos de lectura diferentes: con 1, 2 o 4 canales. Cada uno de esos modos tiene disponibles 4 velocidades de lectura: 100kHz, 344 kHz, 709 kHz y 855 kHz. Cabe destacar que existen dos modos con velocidad de lectura de 344 kHz (con atenuación 0 y con atenuación 1), lo que hace que en total haya 15 posibles modos de lectura.

\* Modo 1 tiene velocidad de lectura de 344 kHz (Attn 0), por lo que su tiempo de lectura es de

- 13.5 s.
- \* Modo 2 tiene velocidad de lectura de 344 kHz (Attn 1), por lo que su tiempo de lectura es de 13.5 s.
  - \* Modo 3 tiene velocidad de lectura de 709 kHz, por lo que su tiempo de lectura es de 7.2 s.
  - \* Modo 4 tiene velocidad de lectura de 100 kHz, por lo que su tiempo de lectura es de 43.6 s.
  - \* Modo 5 tiene velocidad de lectura de 855 kHz, por lo que su tiempo de lectura es de 6.6 s.

Por otro lado, CARONTE dispone de un total de 4 modos pero solo el modo de alta ganancia está disponible para su uso en ciencia. Se trata de un modo con dos ganancias disponibles: 0 y 60.

Modo	CAMELOT2					CARONTE	
	1	2	3	4	5	Ganancia 0	Ganancia 60
$G$ [ $e^-$ /ADU]	4.23	8.54	8.98	0.79	18.97	0.779	0.309
RON [ $e^-$ ]	6.01	11.62	12.11	5.31	23.82	3.683	1.698

Tabla 3.6: Valores de la ganancia y del ruido de lectura para cada una de las configuraciones disponibles de las cámaras CAMELOT2 y CARONTE (IAC (a)), (IAC (b)).

- **Escala de placa:** La escala de placa del detector determina los segundos de arco del cielo que están representados en un píxel en la imagen. A continuación se muestran los valores de la escala de placa para ambas cámaras:
  - \* Escala placa de CAMELOT2: 0,322"/píxel (IAC (a))
  - \* Escala placa de CARONTE: 0,0811"/píxel (IAC (b)).
 Hay que tener en consideración que las imágenes obtenidas con la cámara CARONTE fueron tomadas con un binning 4x4, por lo tanto, el valor de la escala de placa que se ha introducido en el código ha sido 0,3244"/píxel.

• **Telescopio**

Por último, la cantidad de fotones que se recogen y, por tanto la imagen resultante, dependerá de las características físicas del telescopio. A continuación se detallan los parámetros que influyen en esto.

- **Área recolectora:** El IAC80 tiene un espejo primario cuyo diámetro exterior mide 819,8866 mm (Témich). Considerando la expresión del área de un círculo,  $A = \pi \cdot (D/2)^2$ , se obtiene que el área recolectora total es 0,528 m<sup>2</sup>.
- **Número de espejos:** El telescopio IAC80 tiene dos espejos, uno primario y uno secundario. Además, dispone de un corrector de campo constituido por dos lentes fabricadas en vidrio óptico de borosilicato conocido como BK7 (Témich). Tanto los espejos como el sistema de corrector de campo influyen en la cantidad de radiación que nos llega, por lo que se consideran los 3 elementos a la hora de modificar este parámetro en el código.
- **Eficiencia de los espejos:** Tras la aluminización de los espejos, la reflectividad de estos se ha visto mejorada y por tanto, la eficiencia del telescopio. Se dispone de los datos de eficiencia, tanto de los espejos como del corrector de campo del IAC80, proporcionados por el investigador Félix Gracia Témich. Realizando la media de todos los valores se obtiene una eficiencia del 86 %.

**Funciones definidas en el código**

La calculadora de tiempo de exposición desarrollada para CAMELOT2 en el IAC80, está basada en la teoría que usa la calculadora en el Isaac Newton Group of Telescopes. Esta calculadora, diseñada por el investigador del ING Chris Benn, está desarrollada en el lenguaje de programación Fortran 77. Es por ello que ha sido necesario realizar un análisis exhaustivo del código implementado. A continuación se recogen algunas de las funciones definidas necesarias para la elaboración de la ETC de CAMELOT2 y de CARONTE.

Para el cálculo de la SNR dado un tiempo de exposición y para el cálculo del tiempo de exposición dada la SNR es necesario conocer el número de fotones por unidad de tiempo que se tienen de la fuente analizada así como del fondo de cielo. Dada la magnitud aparente de un objeto, el número de fotones que se recibe viene determinada por el número de fotones por unidad de área, tiempo y longitud de onda de la estrella de referencia Vega  $N_{*ref}$  [ $\gamma/m^2 s nm$ ], la transmisión de la atmósfera dada la masa de aire  $T_{atm}$ , el tiempo de exposición  $t$  en

segundos, el área real del telescopio  $A$  [m<sup>2</sup>], el rendimiento del sistema *throughput* y la eficiencia cuántica del detector  $QE$  en el ancho de banda  $\Delta\lambda$  [nm], tal y como se muestra en la expresión 3.3.

$$N_* = 10^{-0,4mag} \cdot N_{*ref} \cdot T_{atm} \cdot t \cdot A \cdot \Delta\lambda \cdot throughput \cdot QE \quad (3.3)$$

Para calcular el número de fotones de la estrella de referencia disponemos del valor del flujo en unidades de [Jy]<sup>2</sup> para cada filtro (ver Tabla 3.3). El flujo por unidad de longitud de onda se relaciona con el flujo por unidad de frecuencia mediante la expresión 3.4

$$F_\lambda \left[ \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2 \text{ \AA}} \right] = \frac{c}{\lambda^2} \cdot F_\nu \left[ \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2 \text{ Hz}} \right] \quad (3.4)$$

La energía de un fotón viene determinada por  $E_\gamma = hc/\lambda$ , siendo  $h = 6,626 \cdot 10^{-27}$  [erg s] la constante de Planck y  $c = 3 \cdot 10^8$  [m/s] la velocidad de la luz en el vacío. De modo que el número de fotones de una determinada longitud de onda será  $N_\gamma = F_\lambda/E_\gamma$ .

Por tanto, el número de fotones de la estrella de referencia Vega se define mediante la siguiente expresión:

$$N_{*ref} \left[ \frac{\gamma}{\text{m}^2 \text{ s nm}} \right] = 10^4 \cdot \frac{c/\lambda^2 \cdot F_\nu \left[ \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2 \text{ Hz}} \right]}{hc/\lambda} = 10^4 \cdot \frac{F_\nu \cdot 10^{-23} [\text{Jy}]}{h \cdot \lambda} = 10^8 \cdot \frac{F_\nu [\text{Jy}]}{6,62 \cdot \lambda [\text{nm}]} \quad (3.5)$$

donde el factor  $10^4$  se incluye para ajustar las unidades de cm<sup>2</sup> a m<sup>2</sup>.

Del mismo modo, el número de fotones del fondo de cielo por píxel se define a partir de la siguiente expresión:

$$F_{\text{cielo}} = 10^{-0,4mag_{\text{cielo}}} \cdot N_{*ref} \cdot T_{atm} \cdot t \cdot A \cdot \Delta\lambda \cdot throughput \cdot QE \cdot arcsecpix^2 \quad (3.6)$$

donde *arcsecpix* es la escala de placa del detector.

Conociendo el número de fotones del objeto analizado y del fondo de cielo, es posible calcular la SNR mediante la expresión 3.7:

$$SNR = \left[ \frac{F_* \cdot t}{\sqrt{F_* \cdot t + npix \cdot (F_{\text{cielo}} \cdot t + RON^2)}} \right] \quad (3.7)$$

donde  $F_*$  es el flujo del objeto definido en la ecuación 3.3,  $F_{\text{cielo}}$  es el flujo del fondo de cielo y  $RON$  es el ruido de lectura del detector.

Asimismo el tiempo de exposición conocida la relación Señal-Ruido, viene de despejar  $t$  en la ecuación 3.7, obteniéndose la siguiente expresión:

$$t = \frac{[F_* + npix \cdot F_{\text{cielo}}] SNR^2 + \sqrt{[(F_* + F_{\text{cielo}} + npix) SNR^2]^2 + 4F_*^2 \cdot SNR^2 \cdot npix \cdot RON^2}}{2 \cdot F_*^2} \quad (3.8)$$

Otro de los resultados que se obtiene al usar la ETC es el número de cuentas en el pico del objeto. Para determinarlo se ha considerado que la distribución de energía se ajusta a un perfil gaussiano.

Una distribución gaussiana bidimensional centrada en  $(x_0, y_0)$  se describe mediante la siguiente fórmula:

$$G(x, y) = A \cdot \exp \left[ - \left( \frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] = A \cdot \exp \left[ - \frac{r^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.9)$$

donde  $A$  es la amplitud máxima (el valor en el pico) y  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las desviaciones estándar en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente, que en el caso de una distribución gaussiana simétrica coinciden.

La relación entre la desviación estándar y la FWHM de una fuente puntual viene dada por  $\sigma = FWHM/(2\sqrt{2 \ln 2})$ . Integrando la expresión de la distribución gaussiana obtenemos el equivalente al flujo total del objeto, tal y como se muestra a continuación:

$$F_* = \int G(x, y) dx dy = A \cdot 2\pi\sigma^2 \Rightarrow A = \frac{F_*}{2\pi\sigma^2} \Rightarrow A = \frac{4 \cdot \ln(2) \cdot F_*}{\pi \cdot FWHM^2} \quad (3.10)$$

Considerando la escala de placa *arcsecpix* el pico en la imagen viene determinado por la expresión 3.11.

$$peak = F_* \cdot \frac{4 \cdot \ln(2)}{\pi} \left[ \frac{arcsecpix}{FWHM} \right]^2 \quad (3.11)$$

---

<sup>2</sup>1Jy = 10<sup>-23</sup> erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>

**Variables introducidas por el usuario**

Para el correcto funcionamiento de la calculadora es imprescindible que el usuario introduzca una serie de variables, tal y como se muestra en la Figura 3.6

Figura 3.6: Interfaz de la Calculadora de tiempo de exposición de CAMELOT2. En ella se muestran las variables que debe introducir el usuario para obtener el valor de SNR o tiempo de exposición deseado (IAC (c)).

En relación al instrumento se ha de especificar qué filtro y con qué velocidad de lectura se van a tomar las imágenes. Es necesario establecer el modo de funcionamiento de la calculadora, pues se tiene la opción de definir el tiempo de exposición para obtener la SNR o viceversa.

En cuanto al objeto observado se debe indicar si es puntual o extendido y el valor de su magnitud aparente. Los objetos empleados para la elaboración de este trabajo se consideran objetos puntuales cuya magnitud viene recogida en un catálogo de estrellas estándar proporcionado por el investigador Manuel Sánchez Benavente tal y como se explicará en la Sección 3.2.

Con respecto al cielo, es necesario concretar el brillo del cielo en función de la fase de la Luna. En nuestro caso, las imágenes capturadas con CAMELOT2 en la noche del 4 de noviembre de 2023 fueron tomadas entre las 20h 03' 14.013" y las 20h 12' 50.561". Por otro lado, las imágenes obtenidas con CARONTE fueron tomadas entre las 23h 49' 50" de la noche del 4 de junio de 2024 y las 00h 02' 58" de la madrugada del 5 de junio de 2024. En ambos períodos de tiempo no se tenía ningún tipo de contaminación lumínica por parte de la Luna, por lo que a la hora de utilizar la ETC se ha definido el brillo del cielo como "Dark".

Además, se debe considerar la extinción correspondiente al filtro utilizado, así como la masa de aire presente a la hora de tomar las imágenes y el seeing (definido en la calculadora como la FWHM) de la noche de observación. En este trabajo la masa de aire se ha obtenido de la cabecera de la imagen. Una estimación del seeing en una noche de observación se puede obtener a partir de la medida de la FWHM de la distribución gaussiana de las fuentes puntuales. Por tanto, su valor se ha determinado con el comando *imexam* del software "IRAF" (Image Reduction and Analysis Facility), como se explicará más adelante en la Sección 3.3.4.

Los coeficientes de extinción atmosférica que se han utilizado para cada uno de los filtros Johnson se muestran en la Tabla 3.7. Estos valores se han medido con el telescopio Meridiano Carlsberg en el observatorio de El Roque de los Muchachos (La Palma).

Filtro	U	B	V	R	I
Extinción atmosférica	0.55	0.25	0.12	0.09	0.06

Tabla 3.7: Extinción atmosférica para los filtros UBVR I (Isaac Newton Group of Telescopes).

## 3.2 Datos utilizados

Para comprobar el correcto funcionamiento de la calculadora ha sido necesario emplear un conjunto de fuentes cuya magnitud en cada uno de los filtros utilizados es conocida. Se dispone de un catálogo de estrellas estándares pertenecientes a diferentes cúmulos estelares y globulares de la Vía Láctea elaborado por Peter B. Stetson durante 224 noches de observación (Stetson (2000)). Este catálogo ha sido proporcionado por los observadores e investigadores del IAC Matteo Monelli y Manuel Sánchez Benavente y contiene la información de un total de 84535 estrellas.

En él se recogen tanto el nombre de las fuentes como sus posiciones en el cielo (RA y Dec) y los valores de las magnitudes aparentes, así como sus errores, en cada uno de los filtros de Johnson.

Además, se dispone de un conjunto de imágenes astronómicas reducidas que fueron tomadas por el investigador Manuel Sánchez Benavente durante dos noches fotométricas.

Una noche se considera fotométrica si el coeficiente de extinción permanece estable durante el transcurso de la misma. Dado que no se dispone de un telescopio cuya finalidad sea prever si una noche va a ser fotométrica o no, el investigador Manuel Sánchez establece algunas consideraciones previas para asegurarse que lo va a ser. Concretamente realiza un análisis anticipado de la estabilidad de las condiciones climáticas durante el día. La ausencia de nubes, la ausencia de calima, una baja variabilidad de la humedad... indican una gran probabilidad de que esa noche sea fotométrica.

Para corroborarlo, analiza las cuatro estrellas más brillantes de tres conjuntos de estrellas estándares en tres momentos diferentes (al principio, a mitad y a final de la noche) observadas para tres valores de masa de aire diferentes. Además, observa una estrella variable perteneciente al campo de estrellas que se quiere analizar, así como una estrella situada por encima de  $30^\circ$  y que recorra varias masas de aire durante toda la noche, de manera que es posible seguirla continuamente.

El ajuste que se obtiene al representar la magnitud frente a la masa de aire para las estrellas estándares permite conocer el valor del coeficiente de extinción. A partir de los diferentes ajustes para cada una de las estrellas estándares se comprueba si la extinción varía o no y por tanto, si la noche se puede considerar fotométrica.

Las imágenes con las que se ha trabajado para la realización de la calculadora de cada una de las cámaras son las siguientes:

- CAMELOT2: Cinco imágenes del campo ST34 del cúmulo abierto NGC 6940 tomadas con los filtros UBVRI durante la noche del 4 de noviembre de 2023.
- CARONTE: Cinco imágenes del campo ST28 del cúmulo abierto NGC 6633 tomadas con los filtros UBVRI durante la noche del 5 de junio de 2024.

### 3.2.1 Selección de fuentes

En primer lugar, se ha visualizado el conjunto de estrellas del catálogo con ayuda del software astronómico Aladin. En las Figuras 3.7(a) y 3.7(c) se muestran las imágenes obtenidas con el filtro de Johnson V con CAMELOT2 y con CARONTE, respectivamente. Sobre ellas se representan las fuentes contenidas en el catálogo disponible.

De las 84535 estrellas catalogadas, se han seleccionado 10 estrellas en las imágenes de CAMELOT2 y 10 estrellas en las imágenes de CARONTE. En la Tabla 3.8 se muestran las coordenadas de las fuentes seleccionadas con las que se ha trabajado para cada una de las cámaras. En las Figuras 3.7(b) y 3.7(d) se muestran las imágenes obtenidas con el filtro de Johnson V con CAMELOT2 y con CARONTE, respectivamente. Sobre ellas se han marcado en negro las estrellas seleccionadas para la comprobación del funcionamiento de la ETC.

## 3.3 Análisis experimental

Para verificar que los valores que se obtienen con la calculadora son correctos, se ha desarrollado un programa en python (S. Lamolda Mir) que calcula el número de cuentas de una estrella, el fondo de cielo de una imagen, el valor de la SNR y del pico de la estrella. Además, este programa obtiene los valores de tiempo de exposición, de masa de aire a partir de la cabecera de las imágenes astronómicas y las magnitudes aparentes de cada fuente a partir del catálogo disponible. A continuación se detalla el procedimiento seguido para la obtención de cada uno de los parámetros mencionados.

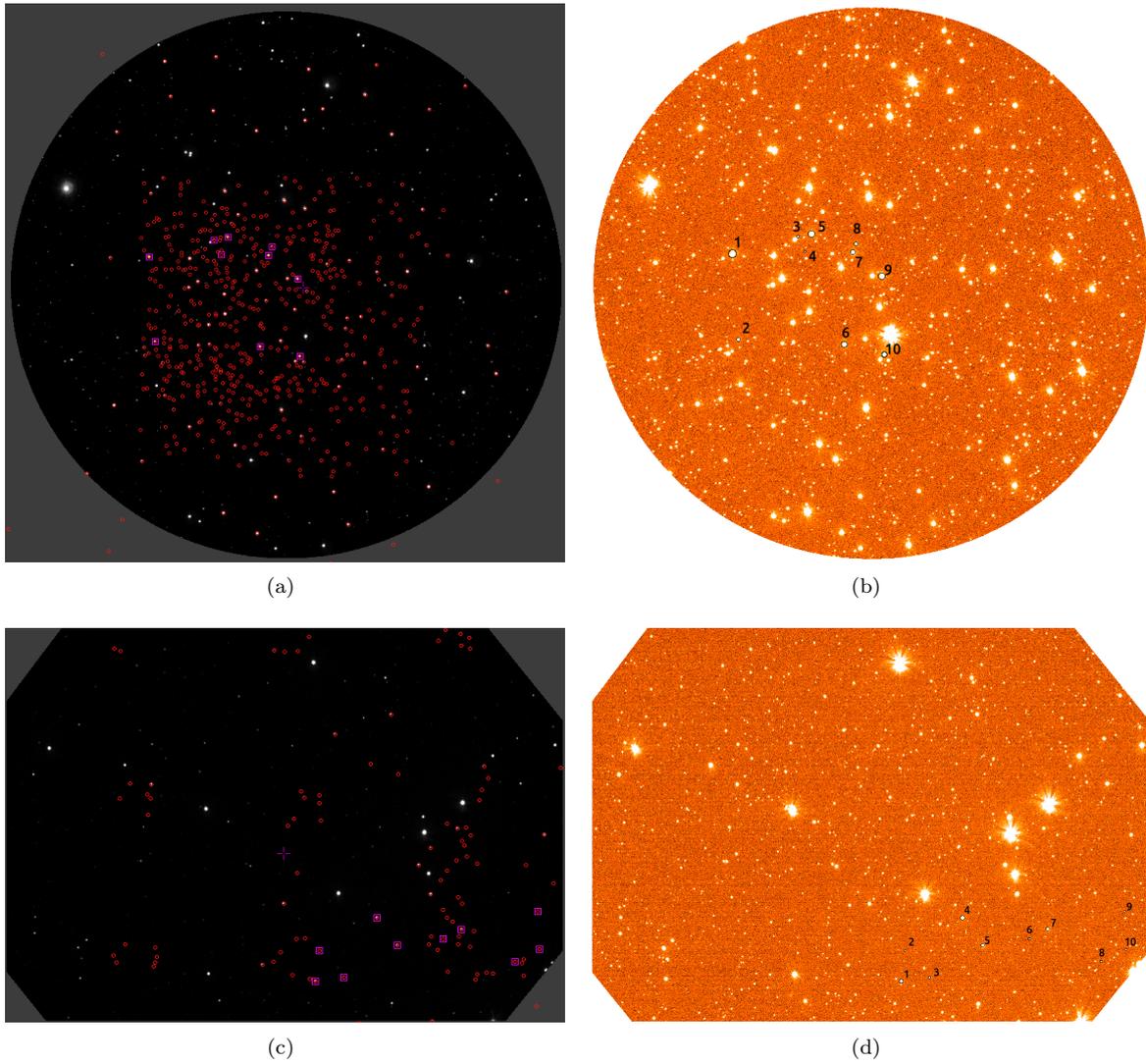


Figura 3.7: A la izquierda: visualización mediante el software Aladin del catálogo de estrellas “standars\_new.fits” (Stetson (2000)) sobre las imágenes capturadas con CAMELOT2 con el filtro V la noche del 4 de noviembre (a) y con CARONTE con el filtro V la noche del 5 de junio de 2024 (c). A la derecha: mismas imágenes visualizadas en el software ds9. Sobre ellas se han marcado en negro las estrellas seleccionadas para la comprobación del funcionamiento de las ETC.

Fuente	RA	Dec
N6940-S61	20:34:22.44141	+28:12:16.0153
N6940-S154	20:34:33.75000	+28:12:26.9398
N6940-S41	20:34:20.14160	+28:14:09.9161
N6940-S56	20:34:22.09717	+28:14:22.0216
N6940-S35	20:34:19.75342	+28:14:33.5092
N6940-S161	20:34:34.40186	+28:15:30.7343
N6940-S57	20:34:22.19971	+28:15:45.7100
N6940-S50	20:34:20.99121	+28:15:51.0658
N6940-S88	20:34:25.31982	+28:16:36.2471
N6940-S176	20:34:35.69092	+28:16:40.4562

Fuente	RA	Dec
N6633-S111	18:27:19.41650	+06:35:59.7765
N6633-S145	18:27:22.79297	+06:35:52.6766
N6633-S314	18:27:19.78271	+06:35:13.1052
N6633-S320	18:27:26.41846	+06:34:18.5907
N6633-S316	18:27:23.33496	+06:33:45.1064
N6633-S159	18:27:24.04541	+06:32:28.6485
N6633-S167	18:27:25.11475	+06:31:58.8549
N6633-S134	18:27:21.51855	+06:3:30.8802
N6633-S321	18:27:27.04834	+06:29:52.7662
N6633-S147	18:27:22.82959	+06:29:50.8470

Tabla 3.8: Coordenadas RA y Dec de las fuentes seleccionadas en las imágenes tomadas con CAMELOT2 (izquierda) y con CARONTE (derecha).

### 3.3.1 Magnitudes aparentes

Para utilizar la calculadora de tiempo de exposición es necesario conocer la magnitud aparente del objeto. Para ello, se ha elaborado una función en el script de python que a partir de las coordenadas en píxeles de un objeto en la imagen, devuelve el valor de la magnitud aparente obtenida con cada filtro en el catálogo. El procedimiento que sigue es el siguiente:

- Convierte, con ayuda del objeto “wcs\_imagen” perteneciente a la librería Astropy, las coordenadas del centroide en píxeles en la imagen a coordenadas físicas del cielo en RA y Dec.
- Mediante la clase “SkyCoords” se crean dos objetos correspondientes a las coordenadas del centroide y a las coordenadas del catálogo.
- Utiliza el método “match\_to\_catalog\_sky” para encontrar la fuente más cercana en el catálogo según las coordenadas del centroide.
- Devuelve el valor de la distancia entre ambas coordenadas para verificar que ha encontrado la fuente correcta, así como la información que contiene el catálogo de la fuente correspondiente.

Los valores de las magnitudes aparentes de las fuentes seleccionadas se recogen en la Tabla 3.9

Fuente	$m_U$	$m_B$	$m_V$	$m_R$	$m_I$	Fuente	$m_U$	$m_B$	$m_V$	$m_R$	$m_I$
N6940-S61	12.114	12.1	11.48	11.1	10.72	N6633-S111	13.32	13.23	12.66	12.3	12
N6940-S154	13.77	13.87	13.33	13.03	12.75	N6633-S145	17.8	17.1	16.02	15.4	14.875
N6940-S41	15.652	15.66	14.91	14.46	14.07	N6633-S314	16.8	15.72	14.42	13.66	-
N6940-S56	18.089	18.23	17.43	16.91	16.4	N6633-S320	13.07	13.07	12.44	12.03	11.7
N6940-S35	12.441	12.375	11.88	11.6	11.33	N6633-S316	13.98	13.83	13.1	12.66	12.25
N6940-S161	12.648	12.68	12.14	11.84	11.55	N6633-S159	17.84	17.53	16.63	16.1	15.65
N6940-S57	12.801	12.81	12.29	11.99	11.69	N6633-S167	13.42	13.35	13.09	12.93	12.8
N6940-S50	14.649	14.7	13.97	13.55	13.14	N6633-S134	16.92	16.47	15.48	14.9	14.4
N6940-S88	12.395	12.38	11.9	11.65	11.37	N6633-S321	17.49	17.22	16.32	15.77	-
N6940-S176	13.026	13.02	12.23	12.29	12.05	N6633-S147	17.72	17.62	16.79	16.26	15.82

Tabla 3.9: Magnitudes aparentes de las fuentes seleccionadas.

### 3.3.2 Tiempo de exposición y masa de aire

Los valores del tiempo de exposición con los que se tomaron las imágenes así como de la masa de aire correspondiente para cada uno de los filtros e instrumentos, se han obtenido a partir de la cabecera de las imágenes y se recogen en la Tabla 3.10.

Filtro	CAMELOT2					CARONTE				
	U	B	V	R	I	U	B	V	R	I
$t_{exp}$ [s]	500	100	60	60	45	500	100	60	60	45
Masa aire	1.047	1.054	1.0558	1.058	1.059	1.421	1.379	1.37	1.364	1.358

Tabla 3.10: Valores del tiempo de exposición y de la masa de aire para cada uno de los filtros UBVRI y para cada cámara.

### 3.3.3 Fondo de cielo de la imagen

Como se mencionó en la subsección Fondo de cielo de la imagen, es necesario conocer el valor del fondo de cielo de las imágenes para restarlo de las cuentas obtenidas de cada objeto, permitiendo así conocer el valor real de cuentas de las fuentes.

Para ello, con ayuda de la biblioteca Astropy, se ha definido una función en el script de python que efectúa los siguientes pasos:

- Extrae los datos de la imagen FITS.
- Detecta las fuentes de la imagen en un recorte sigma (sigma-clip). Para ello se define un umbral que indica el valor de señal por encima del cual se considera que una región en la imagen contiene una fuente astronómica.

- Mediante estadística obtiene el valor del fondo de cielo como la mediana del valor de todos los píxeles que no se han detectado como fuente astronómica.

Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.11.

Filtro	Número de cuentas del cielo por píxel				
	U	B	V	R	I
CAMELOT2	7.12	9.55	15.76	35.62	99.54
CARONTE	53.66	91.34	96.59	101.69	95.95

Tabla 3.11: Valores del fondo de cielo por píxel en ADU de las imágenes tomadas con los filtros UBVRI y con cada una de las cámaras.

Para cerciorarnos que las cuentas del cielo obtenidas son correctas, se han comparado con el número de cuentas obtenido realizando fotometría de apertura. Para ello se ha fijado un anillo alrededor de la apertura que define las fuentes analizadas. Este anillo viene determinado por un radio interno  $r_{int}$  y un radio externo  $r_{ext}$ , tal y como se observa en la Figura 3.8. La mediana de la señal de los píxeles que engloba el anillo es un buen indicador del valor del flujo del fondo de cielo por píxel. En todos los casos, se obtiene un número de cuentas similar al recogido en la Tabla 3.11.

Para poder comparar estos resultados con los valores que se obtienen con la calculadora, es necesario multiplicar por la ganancia y dividir entre el tiempo de exposición, para pasar de tener unidades de ADU a unidades de  $[e^-/s]$  tal y como se muestra a continuación:

$$F_{\text{cielo}} [e^-/s] = \frac{F_{\text{cielo}} [\text{ADU}] \cdot G [e^-/\text{ADU}]}{t_{\text{exp}} [s]} \quad (3.12)$$

### 3.3.4 Número de cuentas o flujo del objeto

El número de cuentas de los objetos seleccionados se ha obtenido mediante fotometría con ayuda de la función “`aperture_photometry`” de la biblioteca `Photutils` ([Photutils Developers](#)). Para ello es necesario conocer las coordenadas y la FWHM de cada uno de los objetos. Por tanto, se ha definido una función en el script de python que realiza lo siguiente:

- Pide introducir el valor de las coordenadas (x,y) en píxeles de una imagen FITS.
- Mediante la clase “`CircularAperture`” define una apertura circular centrada en las coordenadas asignadas por el usuario. Utiliza un radio de apertura inicial de 8 píxeles lo que equivale a una aproximación inicial para el seeing (y por tanto, para la FWHM) típico del IAC80, que suele estar entorno a 1,8 arcsec.
- Mediante la clase “`ApertureStats`” calcula el centroide y la FWHM de la fuente en píxeles.
- Transforma el valor de la FWHM en píxeles a unidades de arcsec.

Con el objetivo de verificar que la FWHM es la correcta se ha recurrido a la tarea “`imexam`” de IRAF, la cual nos permite interactuar de manera visual con las imágenes astronómicas.

Concretamente, si se pulsa “r” en el teclado teniendo el cursor sobre el píxel central de una fuente en la imagen, se representa el número de cuentas de la imagen frente a la distancia radial (en píxeles) centrado en el cursor. Además, se ajusta una gaussiana por lo que es posible conocer la anchura a media altura de la fuente. La media de los tres últimos valores que muestra el gráfico es un buen indicador de la FWHM en píxeles.

Se ha comprobado que los valores que se obtienen con ambos métodos son similares.

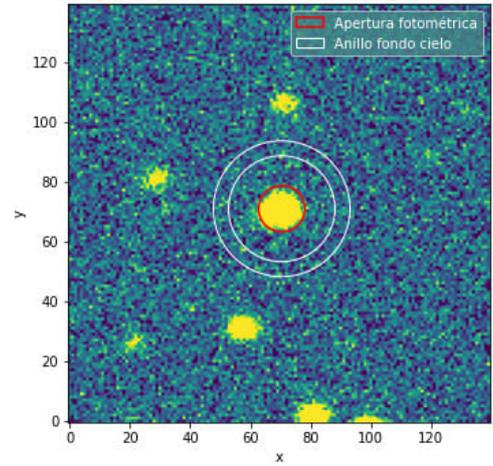


Figura 3.8: Fotometría de apertura de una fuente en la imagen obtenida con el filtro V con la cámara CAMELOT2. En blanco se marca la apertura del objeto y en rojo se indica el anillo para determinar el fondo de cielo.

Otro de los valores que se adquieren con esta tarea es el número de cuentas en el pico.

En la Figura 3.9 se muestra un ejemplo del uso de “imexam” para la fuente N6940-S629 observada en la imagen capturada con el filtro V con la cámara CAMELOT2.

Una vez conocido el valor del centroide de la fuente y de la FWHM, se emplea fotometría para hallar el flujo del objeto. Se ha de tener en cuenta que esta función se ejecuta sobre la imagen a la que se ha restado el valor del cielo.

La función utilizada en el script de python realiza los siguientes pasos:

- Define una apertura circular centrada en las coordenadas del centroide y cuyo radio es igual a la FWHM en píxeles.
- Mediante la función `aperture_photometry` se realiza fotometría en la apertura definida y se obtiene el valor del flujo del objeto en ADU.

Del mismo modo que ocurre con el fondo de cielo, la calculadora devuelve el flujo de la fuente en unidades de  $[e^-/s]$ , por lo tanto, es necesario emplear la expresión 3.12 para transformar el flujo obtenido en las imágenes en unidades de [ADU] a las unidades correctas y poder verificar los resultados obtenidos.

### 3.3.5 Número de cuentas en el pico del objeto

Generalmente, una forma de saber si una fuente en la imagen está saturada o no es calcular el valor del número de cuentas en el pico. Es por ello que la ETC muestra este valor como resultado.

Para poder comprobar si el pico es correcto, se ha desarrollado una función en el script de python que obtiene dicho valor para cada una de las fuentes en las imágenes. Esta función realiza los siguientes pasos:

- En primer lugar detecta las fuentes de una imagen FITS mediante la función “DAOStarFinder” del paquete Photutils (Photutils Developers.). Para ello se especifica el valor de la FWHM y del umbral a partir del cual se considera que una región en la imagen contiene una fuente astronómica.
- A partir de las coordenadas introducidas por el usuario, busca cual de todas las fuentes detectadas es la correspondiente a la solicitada por el usuario. Para ello calcula la distancia euclidiana entre las coordenadas de cada fuente y las coordenadas proporcionadas y selecciona la fuente más cercana.
- Muestra la información obtenida con DAOStarFinder de la fuente seleccionada en forma de tabla. Los parámetros que se consiguen mediante esta función son el centroide del objeto, su nitidez, la simetría del mismo, el valor del pico o el flujo del objeto, entre otros.

Del mismo modo que los valores obtenidos de la FWHM se verificaron mediante la tarea “imexam” de IRAF, en este caso también se ha revisado que el resultado del pico de las fuentes en cada una de las imágenes era correcto. Una vez obtenidas las cuentas del pico en ADU es necesario multiplicar por la ganancia  $G [ADU/e^-]$  para obtener unidades de  $[e^-]$ , de manera que podamos compararlas con el resultado que devuelve la calculadora.

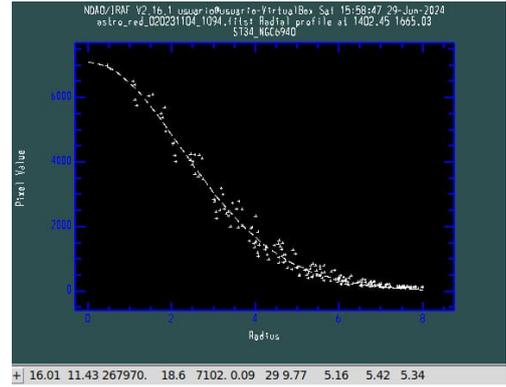


Figura 3.9: Número de cuentas frente a la distancia radial resultado de emplear la tarea “imexam” en la imagen obtenida con CAMELOT2 y con el filtro V de la fuente N6940-S57.

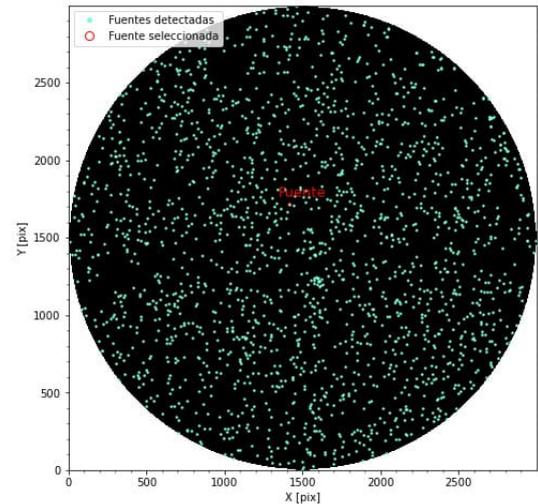


Figura 3.10: Estrellas encontradas en la imagen tomada con el filtro V con CAMELOT2. En rojo se muestra la estrella N6490-S50 encontrada tras indicar las coordenadas del centroide.

### 3.3.6 Relación S/N

El valor más importante y por el que se desarrolla este trabajo es el de la SNR. En el script de python se ha definido una función que, a partir del flujo de la fuente, su FWHM, del valor del fondo de cielo y las características del detector, calcula la SNR y representa gráficamente su variación en función de los múltiplos de la FWHM. A continuación se detallan los pasos que ejecuta:

- Define la ganancia y el ruido de lectura según el modo de adquisición del detector.
- Calcula la SNR a partir de la expresión 3.7 considerando que el área que ocupa la fuente viene determinada por un círculo de radio igual a la FWHM de la fuente. Este cálculo se realiza para radios de apertura que varían desde 0.5 veces la FWHM hasta 4 veces la FWHM, incrementándose en pasos de 0.5.
- Representa gráficamente el valor obtenido de la SNR en función del radio de apertura. En la Figura 3.11 se observa que la SNR se maximiza para radios de apertura próximos al valor de la FWHM.

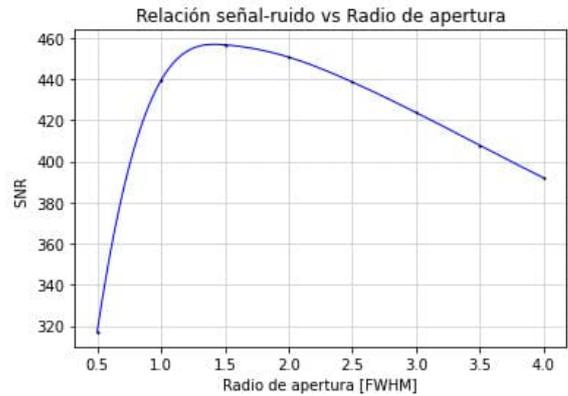


Figura 3.11: Relación Señal-Ruido frente al radio de apertura obtenida para la fuente N6940-S50 con el filtro V con la cámara CAMELOT2.

## 3.4 Comprobación del funcionamiento de la calculadora

En el servidor “Carlota” del IAC se dispone de una aplicación que permite usar una calculadora de prueba de CAMELOT2. Para ello nos hemos conectado por VPN a la red interna del IAC y a Carlota a través de SSH. Una vez conectados se puede acceder a los archivos contenidos en cada una de las calculadoras de prueba.

En el caso de CAMELOT2 se ha modificado mediante el comando “vi” el archivo “Data.php” para así actualizar los valores de los distintos parámetros definidos.

En el caso de CARONTE no existe calculadora,

por lo que se ha creado una igual a la de CAMELOT2 y se ha hecho un análisis similar. Ha sido necesario actualizar los parámetros del archivo “Data.php” de CARONTE al igual que para CAMELOT2. Además se han modificado ciertas líneas del código del archivo “index.php” de manera que se ajusten las distintas opciones del modo de funcionamiento del detector de CARONTE, así como los nombres de las variables que se muestran en la tabla final de resultados de la ETC. En la Figura 3.12 se muestra la calculadora de prueba de CARONTE.

Figura 3.12: Interfaz de la Calculadora de prueba de CARONTE. En ella se muestran las variables que debe introducir el usuario para obtener el valor de SNR o tiempo de exposición deseado.

# Capítulo 4

## Resultados obtenidos y discusión

En este capítulo se describen y discuten los resultados obtenidos en este trabajo. En la sección 4.1 se recogen los resultados obtenidos para CAMELOT2, mientras que en la sección 4.2 se muestran los resultados obtenidos para CARONTE.

### 4.1 CAMELOT2

#### 4.1.1 Fondo de cielo

Como bien se mencionó anteriormente en la subsección [Definición y obtención de parámetros](#) nos encontramos en un máximo del ciclo solar (ver Figura 3.3). Esto implica que el brillo del cielo es aproximadamente 0.5 magnitudes más brillante que los valores establecidos en la calculadora propios de una noche oscura. Por ello, a la hora de obtener el número de cuentas del cielo con cada filtro, se ha hecho uso de la opción “By user” que aparece en la ETC. Los valores obtenidos del fondo de cielo para cada una de las imágenes empleadas en este trabajo ( $N_{\text{cielo, exp}}$ ), así como los obtenidos mediante la calculadora de CAMELOT2 ( $N_{\text{cielo, ETC}}$ ) junto con los de las magnitudes introducidas manualmente en la ETC, se muestran en la Tabla 4.1

Filtro	U	B	V	R	I
$m_{\text{cielo}}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	21.5	21.55	20.7	20.22	19.4
$N_{\text{cielo, exp}}$ [e <sup>-</sup> /s/px]	0.0309	0.2907	0.7235	1.3051	2.6741
$N_{\text{cielo, ETC}}$ [e <sup>-</sup> /s/px]	0.0179	0.244	0.611	0.9668	1.4208

Tabla 4.1: Magnitud del cielo introducida manualmente en la ETC de CAMELOT2 para cada uno de los filtros y resultados obtenidos del fondo de cielo, tanto experimentales como teóricos.

Tal y como se observa en la Tabla 4.1 los valores obtenidos con la ETC difieren de los que se obtienen en las imágenes en mayor o menor medida según el filtro. Por ello se ha probado a modificar la magnitud del cielo que se debe introducir manualmente en la ETC para que el valor del fondo de cielo que se obtiene en ella corresponda al resultante en las imágenes.

Los valores que se obtienen para cada uno de los filtros se presentan en la Tabla 4.2.

Filtro	U	B	V	R	I
$m_{\text{cielo}}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	20.9	21.3	20.3	19.6	18.2
$N_{\text{cielo, exp}}$ [e <sup>-</sup> /s/px]	0.0309	0.2907	0.7235	1.3051	2.6741
$N_{\text{cielo, ETC}}$ [e <sup>-</sup> /s/px]	0.0538	0.366	1.0457	2.2679	8.0758

Tabla 4.2: Magnitud del cielo que se debe introducir en la ETC de CAMELOT2 para cada uno de los filtros para que los resultados de fondo de cielo teóricos coincidan con los experimentales.

Esto implica que el cielo es más brillante de lo que está establecido para noches oscuras, sobre todo en el caso de los filtros R e I. Atendiendo a los estudios realizados del brillo del cielo en el observatorio de La Palma, para estos filtros se obtienen variaciones de hasta varias décimas de magnitud debido a la variación de “airglow” de las líneas de OH en la atmósfera ([Chris R. Benn, Sara L. Ellison \(b\)](#)). Además, otro de los factores que influyen en el brillo del cielo es la posición de los objetos respecto a la eclíptica. Concretamente, según los estudios realizados, el fondo de cielo en la eclíptica es 0.4 mag más brillante que en los polos ([Chris R. Benn, Sara L. Ellison \(b\)](#)). En el caso de CAMELOT2 las fuentes pertenecen al cúmulo abierto NGC6940, cuyas coordenadas son RA: 20h34'30.2" y Dec: +28°16'41". Tal y como se indica, el objeto está cerca de la eclíptica (23°) por lo que es normal que el fondo de cielo que se obtiene en las imágenes sea aún más brillante que el obtenido con la ETC.

Además, se ha comprobado que una variación en la magnitud del cielo únicamente influye en el resultado de la relación Señal-Ruido, pues el número de cuentas del objeto y del pico son independientes del brillo de cielo. Aún así, el cambio que se observa en el resultado de la SNR es ínfimo. Por ejemplo, en el caso del filtro I, para el

que se obtiene un brillo del cielo 1.2 mag más brillantes respecto al introducido en la calculadora, la diferencia en el valor de la SNR es de máximo 15 unidades, lo que supone una variación del 3 % en el error que se tiene respecto al resultado experimental.

### 4.1.2 Flujo del objeto

Los valores del flujo del objeto en unidades de  $[e^-/s]$  tanto experimentales ( $N_{*,exp}$ ) como teóricos ( $N_{*,ETC}$ ) se recogen en la Tabla del Anexo A.1.

En la Figura 4.1 se representa el número de cuentas de los objetos en función de su magnitud aparente, obtenidos experimentalmente y obtenidos con la ETC de CAMELOT2. Tal y como se aprecia, el número de cuentas que se recibe descende cuanto mayor es la magnitud de la fuente (más débil en brillo). Además, se percibe que en el caso del filtro U el número de cuentas es muy bajo. Esto es debido a que este filtro es muy estrecho y tiene una transmitancia considerablemente menor que el resto.

Para verificar el correcto funcionamiento de la ETC se ha representado el promedio del error que se comete entre los valores que se obtienen con la ETC y los que se obtienen de manera experimental. Estos resultados se han comparado con los que se adquieren al utilizar la ETC antigua sin haber sido actualizada.

En el caso del filtro U el error disminuye de un 24.8 % a un 18.15 %. Para el filtro B, con la actualización de los parámetros definidos en la ETC se reduce el error de un 9.04 % a un 4.12 %. En cuanto al filtro V pasamos de tener un error del 13 % a uno del 1.27 %. Con respecto al filtro R no se observa ningún cambio apreciable teniendo en ambos casos un error promedio de 1.27 %. Por último, para el filtro I se consigue un descenso considerable del error pues pasamos de tener un 19.85 % a tener únicamente un 3.13 %. Estos valores, junto con su desviación, se representan en la Figura 4.2.

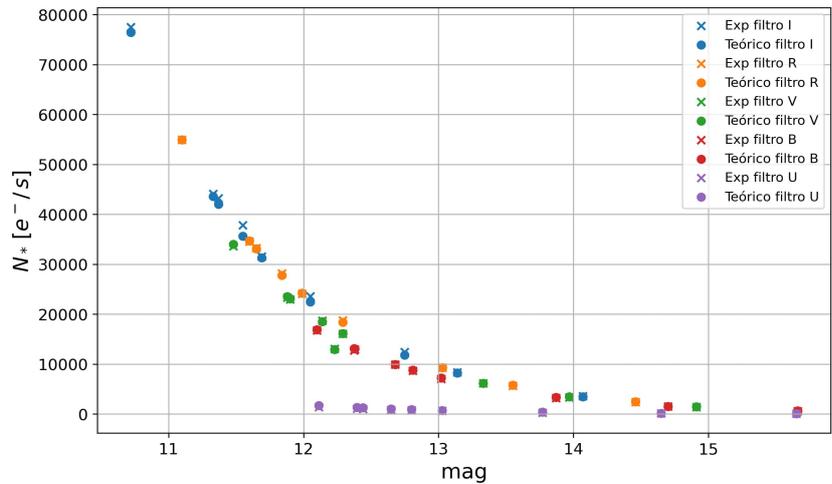


Figura 4.1: Número de cuentas experimental (puntos) y teórico (cruces) de los objetos observados con CAMELOT2 con cada uno de los filtros UBVRl.

### 4.1.3 Pico del objeto

Los valores del número de cuentas del pico de los objetos en unidades de  $[e^-]$  tanto experimentales ( $P_{*,exp}$ ) como teóricos ( $P_{*,ETC}$ ) se recogen en la Tabla del Anexo A.2.

En la Figura 4.3 se representa el número de cuentas del pico de los objetos en función de su magnitud aparente, obtenidos experimentalmente y obtenidos con la ETC de CAMELOT2. Tal y como se aprecia, el número de cuentas del pico que se recibe disminuye para objetos con magnitudes mayores (más débiles en brillo). Además, se percibe que al igual que ocurre con el número total de cuentas, en el caso del filtro U el valor del pico es menor que para el resto de filtros.

En la Figura 4.2 se ha representado el promedio del error que se comete entre los valores que se obtienen con la ETC y los que se obtienen de manera experimental para cada uno de los filtros. Además, se han comparado con los que se adquieren al utilizar la ETC antes de ser actualizada. En todos los casos el error promedio que se comete disminuye al usar la ETC actualizada. Concretamente se observa un cambio del 19 % al 16.5 % para el filtro U, del 12 % al 7.6 % para el B, del 19 % al 2.8 % en el caso del V, del 8 % al 6 % con el R y del 23.6 % al 11.17 % para el filtro I. Además, por lo general las desviaciones son mayores conforme mayor es la magnitud aparente del objeto.

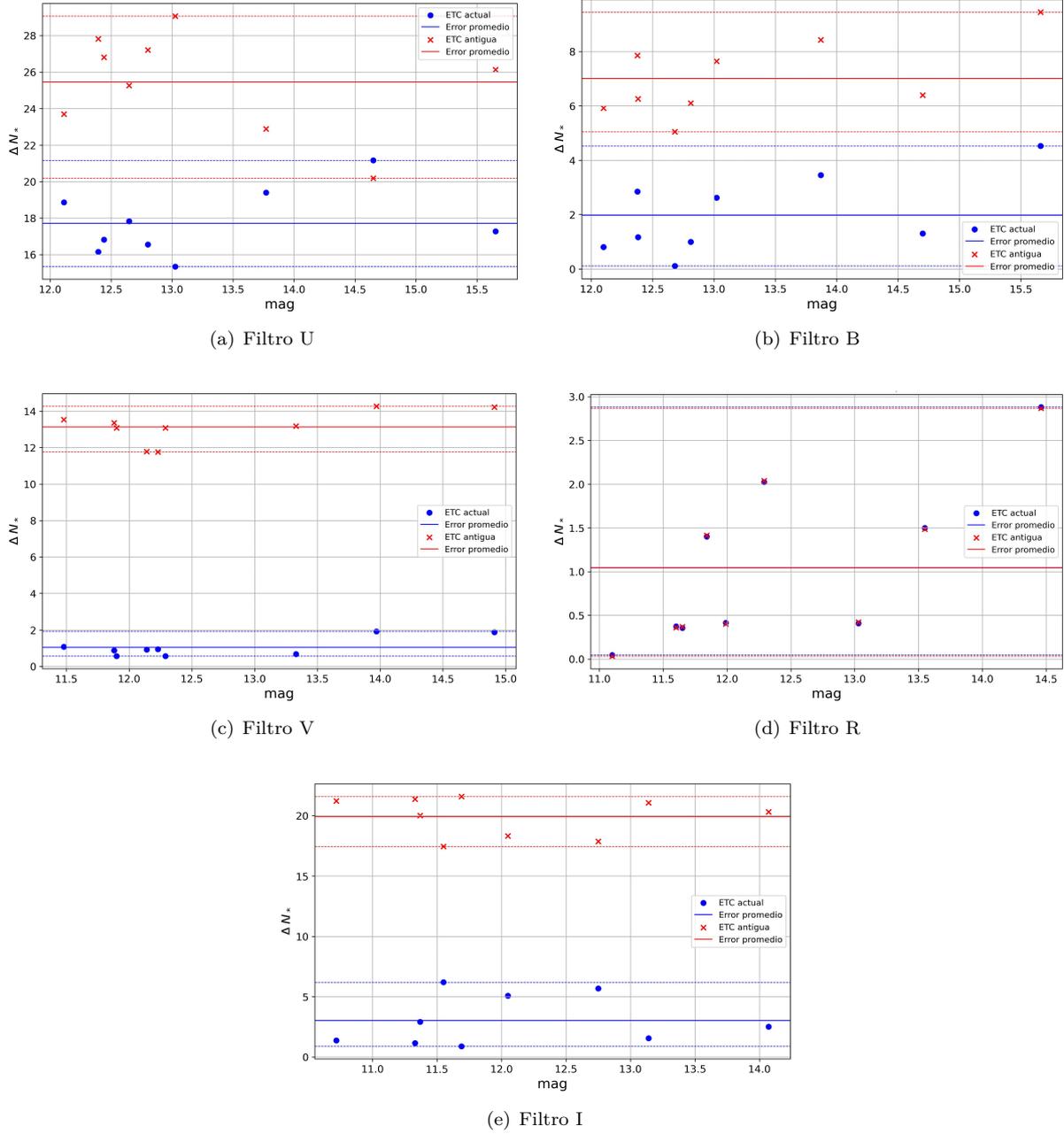


Figura 4.2: Variación del número de cuentas de los objetos observados con CAMELOT2 con cada uno de los filtros UBVR I con la ETC antigua (en rojo) y con la ETC actualizada (en azul). Las líneas continuas representan el valor promedio del error cometido y las líneas discontinuas marcan la desviación.

### 4.1.4 Relación S/N

Los resultados obtenidos de la relación Señal-Ruido para cada una de los objetos de las imágenes tomadas con cada filtro, tanto de manera experimental ( $SNR_{exp}$ ) como de forma teórica con la ETC ( $SNR_{ETC}$ ), se recogen en la Tabla del Anexo A.3.

En la Figura 4.5 se observa la dependencia de la SNR frente a la magnitud aparente de los objetos. Como es de esperar, cuanto mayor es la magnitud menor es la relación Señal-Ruido, pues el número de cuentas que se obtiene para objetos de mayor magnitud es menor y por tanto su relación con el ruido también.

Del mismo modo que para el número de cuentas y para el pico, se ha representado la desviación de los errores que se comete entre los valores experimentales obtenidos mediante fotometría y los valores teóricos resultantes de emplear la ETC, así como el error promedio para cada uno de los filtros.

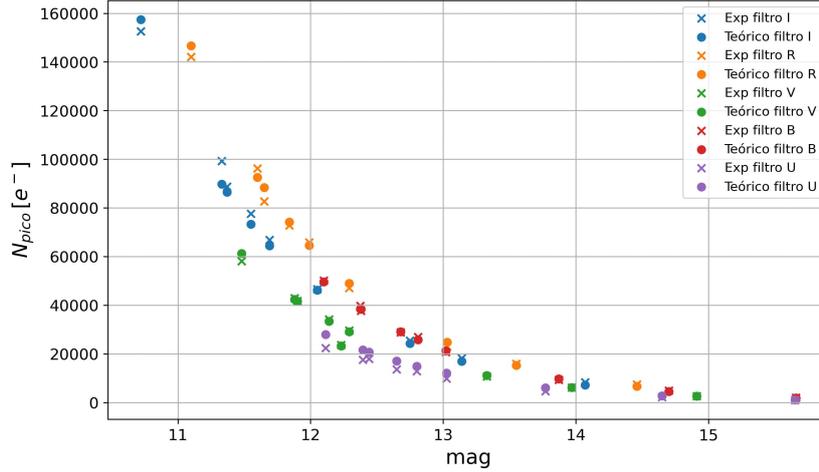


Figura 4.3: Número de cuentas del pico experimental (puntos) y teórico (cruces) de los objetos observados con CAMELOT2 con cada uno de los filtros UBVR.

En la Figura 4.6 se representan dichos errores. Se aprecia un ligero crecimiento del error conforme la magnitud del objeto aumenta. En cualquier caso, los errores máximos que se comenten para la estrella más débil son del 24 %, 22 %, 8 %, 10 % y 19 % para los filtros U, B, V, R e I respectivamente.

En cuanto al error promedio se observa un descenso en casi todos los filtros al actualizar la calculadora, pues pasamos de tener un 12.5 % a un 11 % para el filtro U, de un 5.2 % a un 3.3 % en el caso del B, de un 7.5 % a un 1.5 % para el V y de un 13.4 % a un 3.2 % con el filtro I. Para el filtro R el error promedio aumenta débilmente y pasa de ser un 1.5 %

con la ETC desactualizada a ser un 1.76 % con la actualización de los parámetros. En cualquier caso el error cometido es mínimo, por lo que se consideran resultados correctos.

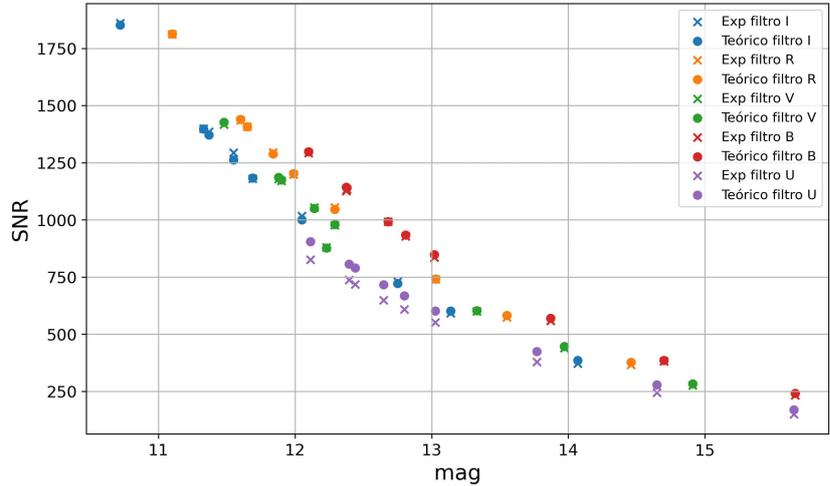


Figura 4.5: Relación Señal-Ruido experimental (puntos) y teórico (cruces) de los objetos observados con CAMELOT2 con cada uno de los filtros UBVR.

## 4.2 CARONTE

### 4.2.1 Fondo de cielo

Los valores obtenidos del fondo de cielo para cada una de las imágenes empleadas en este trabajo ( $N_{cielo,exp}$ ), así como los obtenidos mediante la calculadora de CARONTE ( $N_{cielo,ETC}$ ) junto con los de las magnitudes introducidas manualmente en la ETC (0.5 mag más brillantes que las definidas para una noche oscura), se muestran en la Tabla 4.3.

Al igual que ocurre para CAMELOT2, con CARONTE los valores obtenidos con la calculadora difieren de los calculados experimentalmente en las imágenes. La magnitud introducida para cada uno de los filtros, para que el valor del fondo de cielo obtenido con la ETC se aproxime al de las imágenes, se muestra en la Tabla 4.4.

Estos resultados nos indican que el cielo es más brillante de lo que está establecido para noches oscuras. En este caso las fuentes pertenecen al cúmulo abierto NGC-6633, cuyas coordenadas son RA: 18h27'22.8" y Dec: +06°36'54", lo que implica una cercanía con la eclíptica y por tanto, que el brillo del cielo pueda aumentar hasta 0.4 mag (Chris R. Benn, Sara L. Ellison (b)).

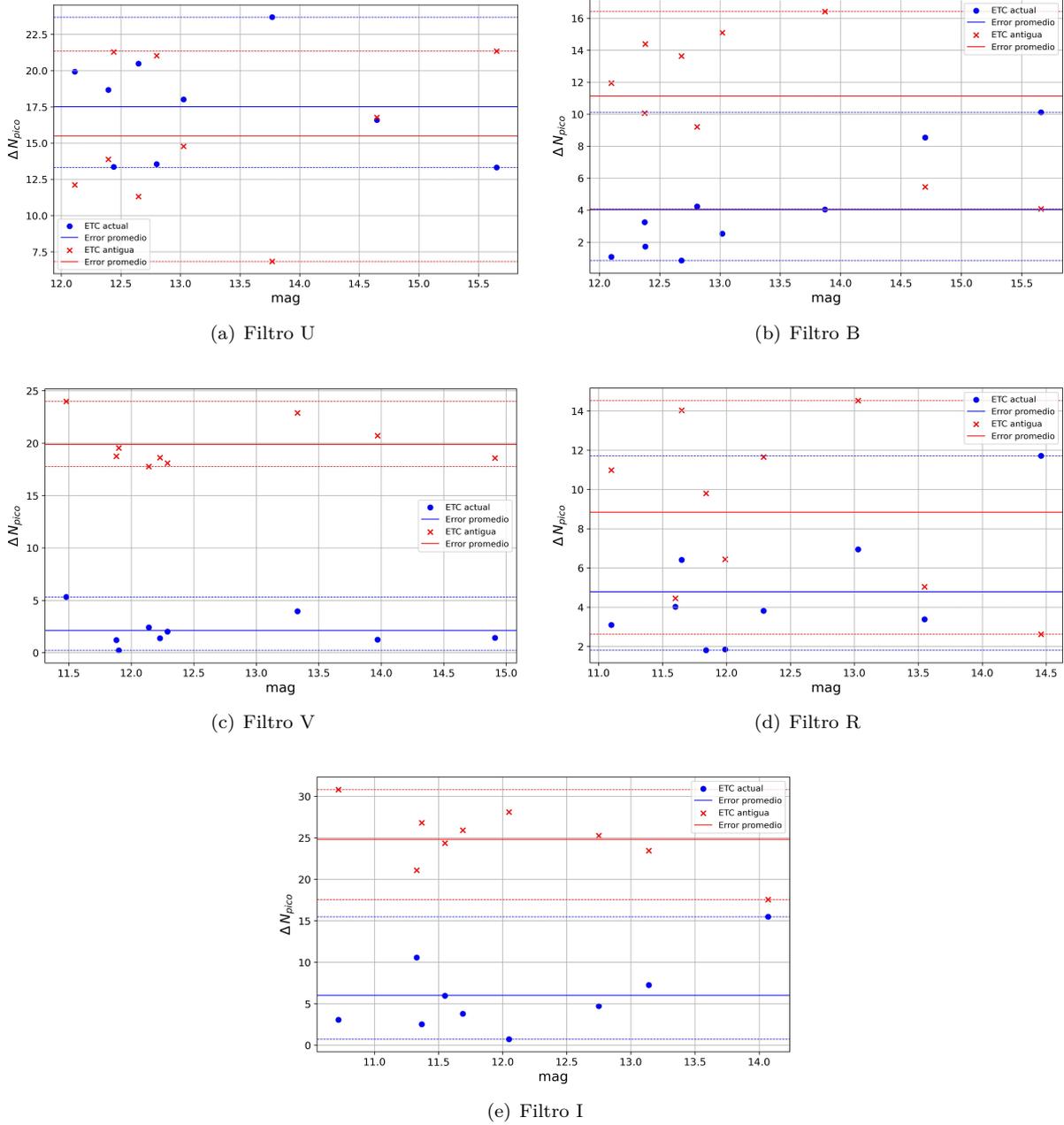


Figura 4.4: Variación del número de cuentas del pico de los objetos observados con CAMELOT2 para cada uno de los filtros UBVRI con la ETC antigua (en rojo) y con la ETC actualizada (en azul). Las líneas continuas representan el valor promedio del error cometido y las líneas discontinuas marcan la desviación.

Por otro lado, la masa de aire con la que se tomaron las imágenes oscila en el rango de 1.358-1.421. Según los estudios realizados en el ORM (Chris R. Benn, Sara L. Ellison (b)) el cielo es 0.3 mag más brillante para masas de aire de 1.5. Por lo tanto, es normal que el fondo de cielo que se obtiene en las imágenes sea aún más brillante que el obtenido con la ETC. La mayor diferencia la encontramos para el filtro I. A pesar de ello, ese cambio en la magnitud del cielo supone una variación de SNR máxima de 9 unidades, lo que implica un descenso del error de un 10% pasando de tener un 35% a un 25% de diferencia respecto al resultado experimental. A pesar de esta poca contribución, se recomienda hacer un estudio más detallado de los valores de fondo de cielo que se miden con cada uno de los filtros en el Observatorio del Teide.

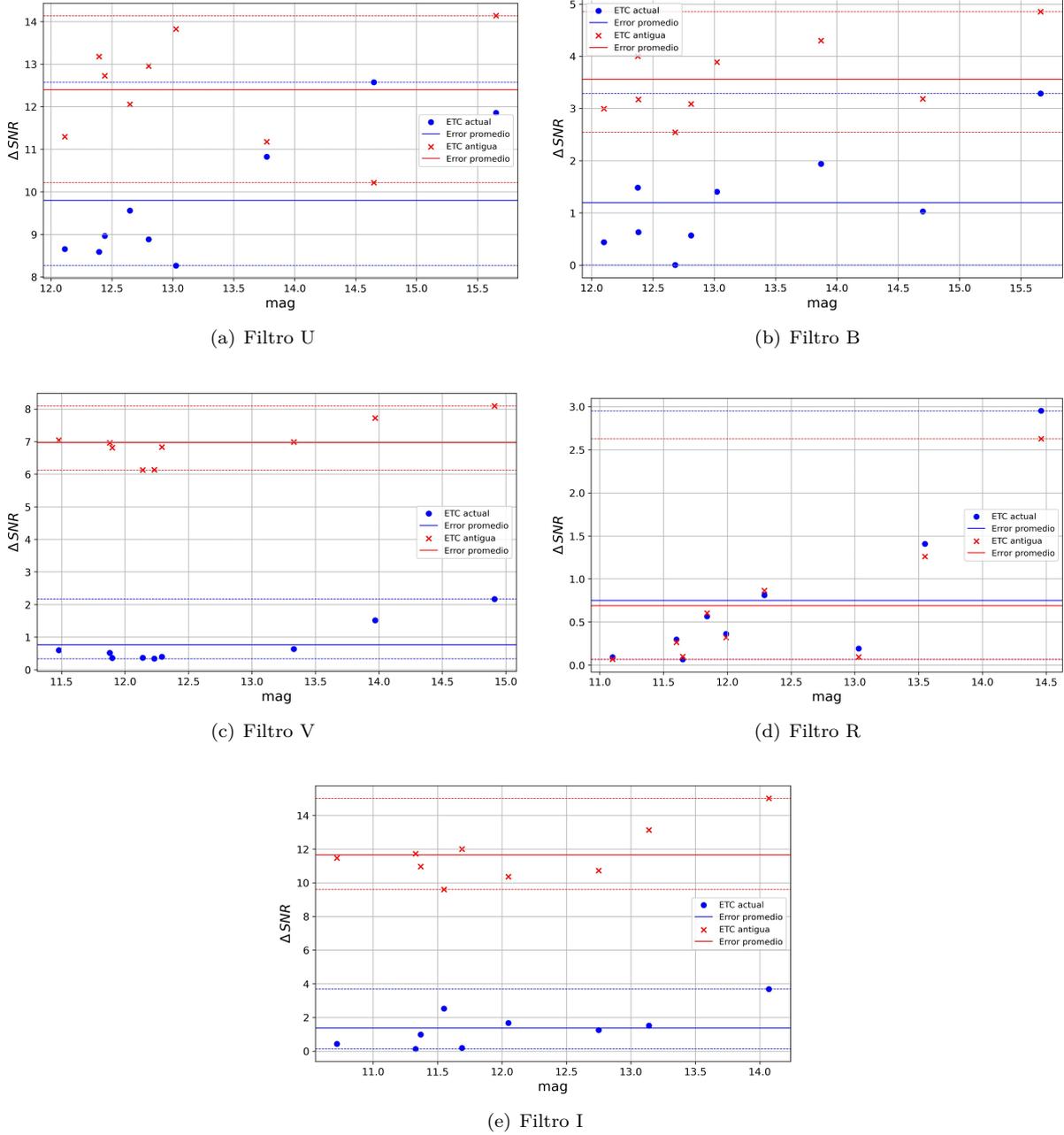


Figura 4.6: Variación de la relación Señal-Ruido de los objetos observados con CAMELOT2 para cada uno de los filtros UBVR con la ETC antigua (en rojo) y con la ETC actualizada (en azul). Las líneas continuas representan el valor promedio del error cometido y las líneas discontinuas marcan la desviación.

### 4.2.2 Flujo del objeto

Los valores del flujo del objeto en unidades de  $[e^-/s]$  tanto experimentales ( $N_{*,exp}$ ) como teóricos ( $N_{*,ETC}$ ) se recogen en la Tabla del Anexo A.4.

En la Figura 4.7 se representa el número de cuentas de los objetos en función de su magnitud aparente obtenido experimentalmente y obtenido con la ETC de CARONTE. Tal y como se aprecia, el número de cuentas que se recibe descende cuanto mayor es la magnitud de la fuente (más débil en brillo). Al igual que con CAMELOT2, se percibe que en el caso del filtro U el número de cuentas es muy bajo. Además, se observa que las cuentas que se obtienen con el filtro I son ligeramente menores que con BVR, pues la eficiencia cuántica del detector para el filtro I es de apenas un 10%.

Para verificar el correcto funcionamiento de la ETC se ha representado el promedio del error que se comete

Filtro	U	B	V	R	I
$m_{\text{cielo}}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	21.5	21.55	20.7	20.22	19.4
$N_{\text{cielo,exp}}$ [e <sup>-</sup> /s/px]	0.0834	0.7115	1.2541	1.3202	1.661
$N_{\text{cielo,ETC}}$ [e <sup>-</sup> /s/px]	0.0383	0.2504	0.4298	0.5056	0.4347

Tabla 4.3: Magnitud del cielo introducida manualmente en la ETC de CARONTE para cada uno de los filtros y resultados obtenidos del fondo de cielo, tanto experimentales como teóricos.

Filtro	U	B	V	R	I
$m_{\text{cielo}}$ [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	20.8	20.5	19.7	19.3	18.1
$N_{\text{cielo,exp}}$ [e <sup>-</sup> /s/px]	0.0834	0.7115	1.2541	1.3202	1.661
$N_{\text{cielo,ETC}}$ [e <sup>-</sup> /s/px]	0.073	0.6587	1.0795	1.1582	1.4394

Tabla 4.4: Magnitud del cielo que se debe introducir en la ETC de CARONTE para cada uno de los filtros para que los resultados de fondo de cielo teóricos coincidan con los experimentales.

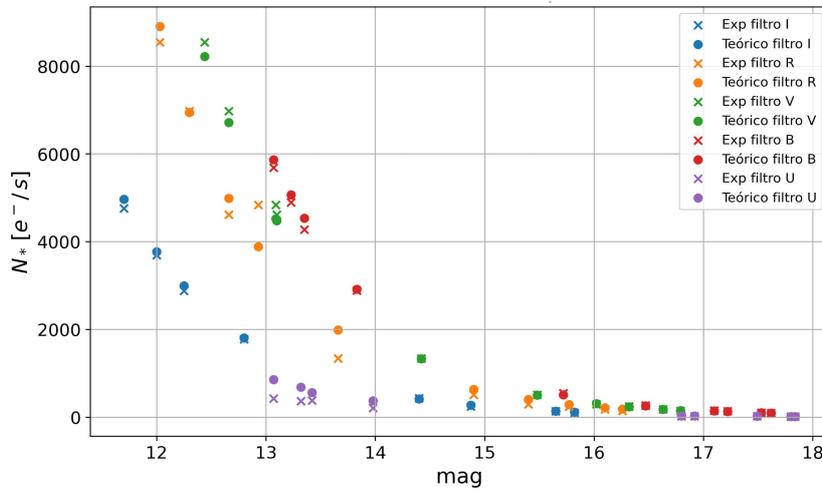


Figura 4.7: Número de cuentas experimental (puntos) y teórico (cruces) de los objetos observados con CARONTE con cada uno de los filtros UBVR I.

entre los valores que se obtienen con la ETC y los que se obtienen de manera experimental para cada uno de los filtros. En el caso del filtro U el error que se comete es de un 30.4 %, para el filtro B se tiene únicamente un 3.32 % de error, en el caso del filtro V el error promedio que se obtiene es de un 3,5 %, mientras que para el filtro R y el filtro I es de un 17 % y un 4.65 % respectivamente. Estos valores, junto con su desviación, se representan en la Figura 4.9. Tal y como se observa, el error máximo que se comete es de un 50 % en el caso del filtro U y de un 32 % en el caso del filtro R. Para el resto de filtros los errores están entorno a un 6-11 %.

### 4.2.3 Pico del objeto

Los valores del número de cuentas del pico en unidades de [e<sup>-</sup>] tanto experimentales ( $P_{*,\text{exp}}$ ) como teóricos ( $P_{*,\text{ETC}}$ ) se muestran en la Tabla del Anexo A.5.

En la Figura 4.8 se representa el número de cuentas del pico de los objetos en función de su magnitud aparente, obtenidos experimentalmente y obtenidos con la ETC montada para CARONTE. Tal y como se aprecia, el número de cuentas del pico que se recibe disminuye para objetos con magnitudes mayores (más débiles en brillo). Además, se percibe que al igual que ocurre con el número total de cuentas, en el caso del filtro U, el valor del pico es mucho menor que para el resto de filtros.

En la Figura 4.10 se ha representado el promedio del error que se comete entre los valores que se obtienen con la ETC y los que se obtienen de manera experimental para cada uno de los filtros.

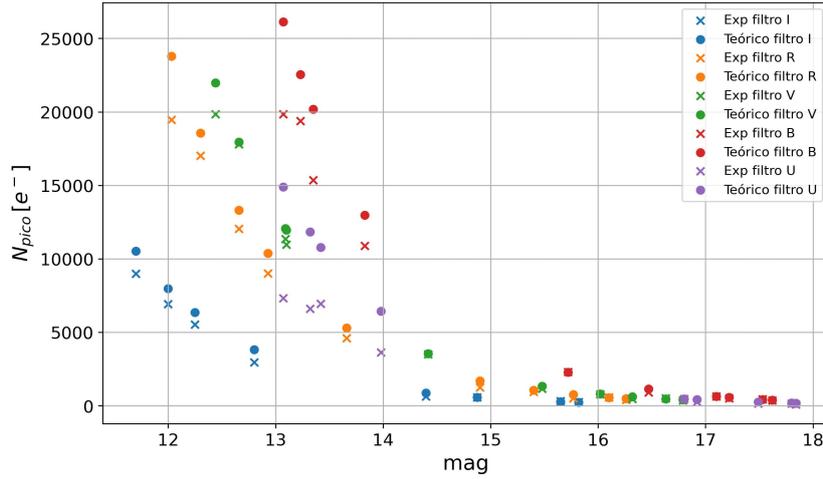


Figura 4.8: Número de cuentas del pico experimental (puntos) y teórico (cruces) de los objetos observados con CARONTE con cada uno de los filtros UBVRI.

En todos los casos, excepto para el filtro U cuya variación alcanza un 38 %, el error promedio que se comete es menor del 15 %, concretamente es del 12.75 %, 8.1 %, 14.6 %, 14.18 % para los filtros B, V, R e I, respectivamente.

#### 4.2.4 Relación S/N

Los resultados obtenidos de la relación Señal-Ruido para cada una de los objetos de las imágenes tomadas con cada filtro, tanto de manera experimental ( $SNR_{\text{exp}}$ ) como de forma teórica con la ETC de CARONTE ( $SNR_{\text{ETC}}$ ), se recogen en la Tabla del Anexo A.6.

En la Figura 4.11 se observa la dependencia de la SNR frente a la magnitud aparente de los objetos. Como es de esperar, cuanto mayor es la magnitud menor es la relación Señal-Ruido, pues el número de cuentas que se obtiene para objetos de mayor magnitud es menor y por tanto su relación con el ruido también.

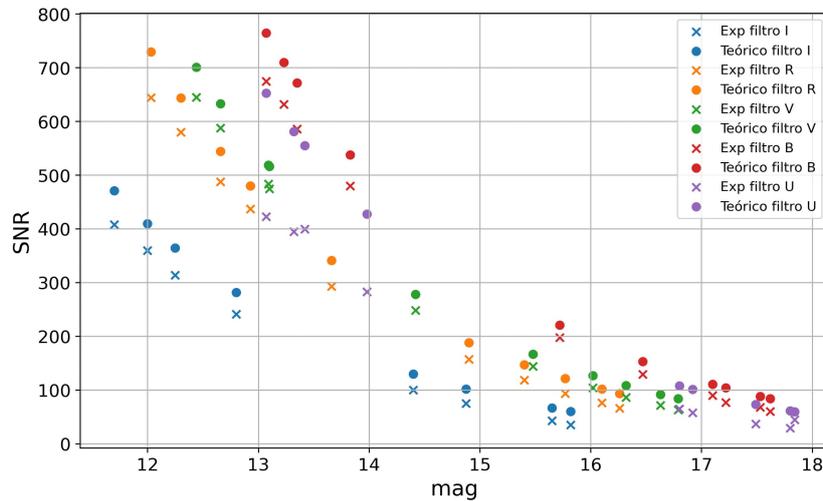
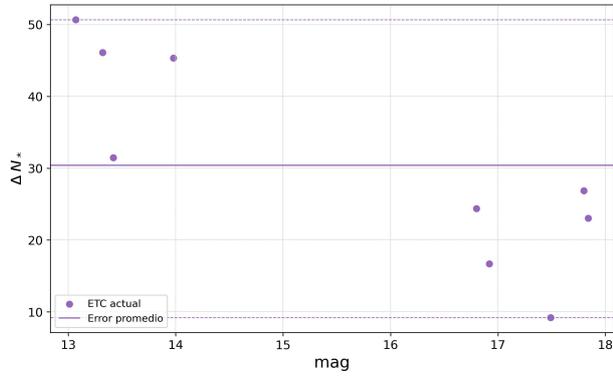


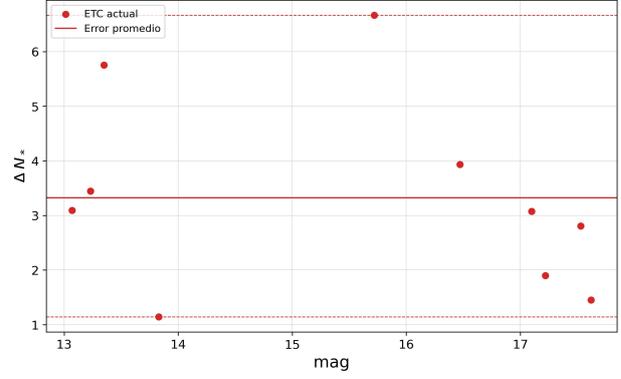
Figura 4.11: Relación Señal-Ruido experimental (puntos) y teórico (cruces) de los objetos observados con CARONTE con cada uno de los filtros UBVRI.

De manera similar al número de cuentas y al pico, se ha representado la desviación de los errores que se comete entre los valores experimentales obtenidos mediante fotometría y los valores teóricos resultantes de emplear la ETC, así como el error promedio para cada uno de los filtros. En la Figura 4.12 se representan dichos errores. Se aprecia un ligero crecimiento del error conforme la magnitud del objeto aumenta.

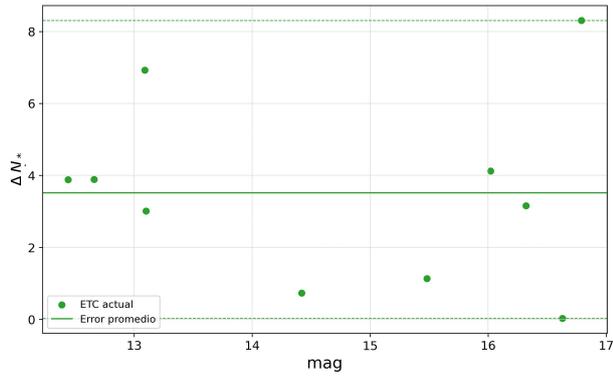
Los errores promedios que se comenten son del 16.8 %, del 14 %, del 16.9 % y del 22.4 % para los filtros B, V, R e I respectivamente. En el caso del filtro U, los errores cometidos son bastante más elevados, pues los valores del número de cuentas también diferían considerablemente respecto a los obtenidos con fotometría.



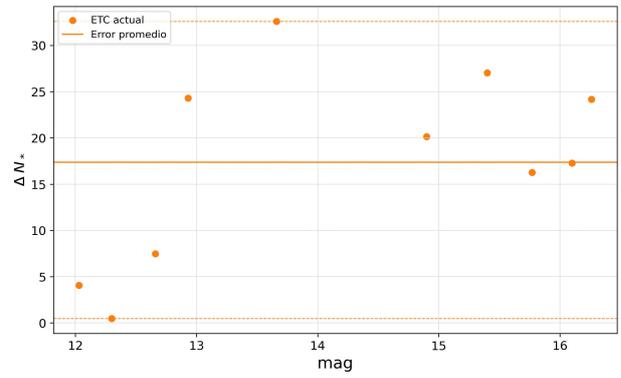
(a) Filtro U



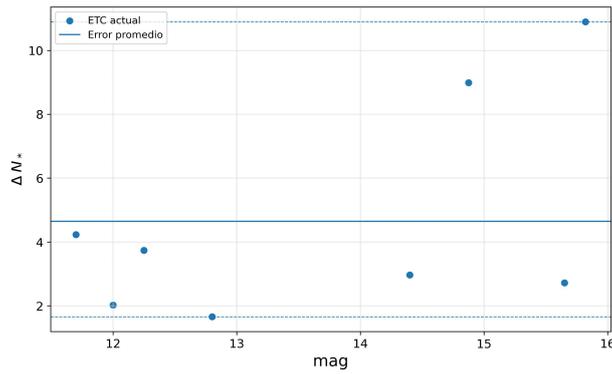
(b) Filtro B



(c) Filtro V

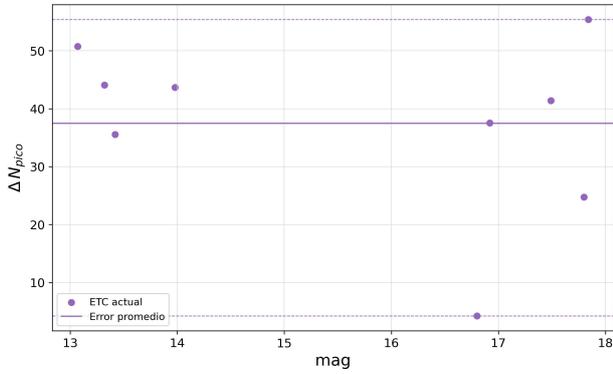


(d) Filtro R

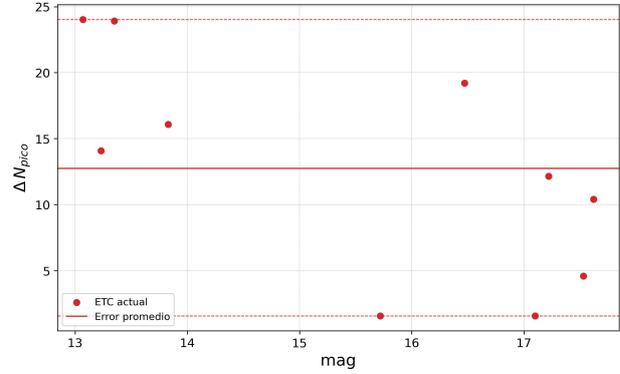


(e) Filtro I

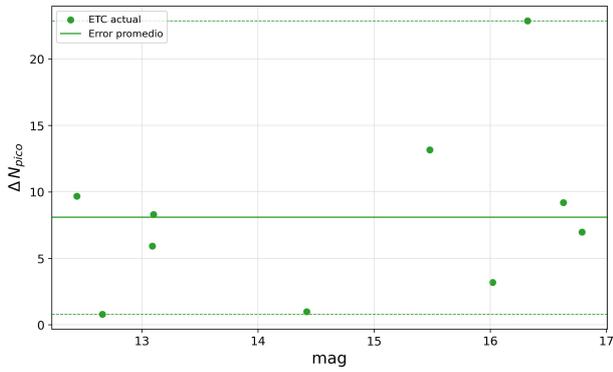
Figura 4.9: Variación del número de cuentas de los objetos observados con CARONTE para cada uno de los filtros UBVRI. Las líneas continuas representan el valor promedio del error cometido y las líneas discontinuas marcan la desviación.



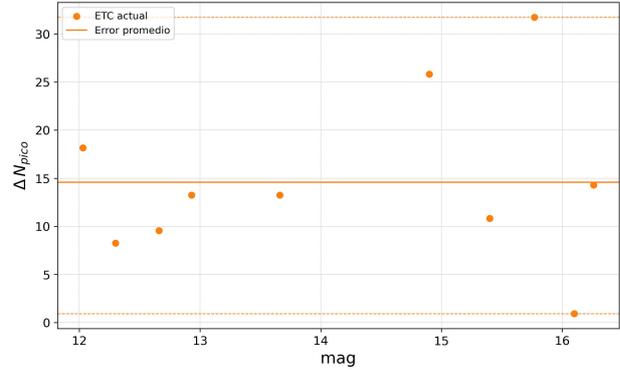
(a) Filtro U



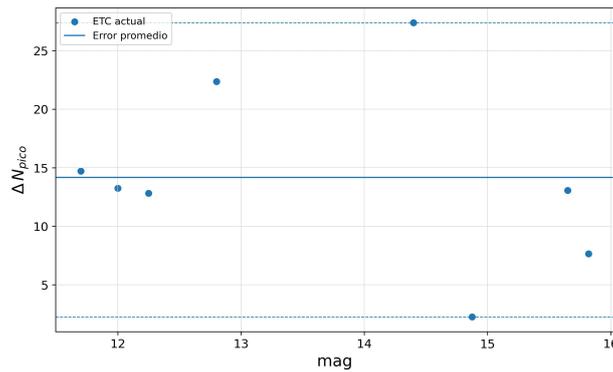
(b) Filtro B



(c) Filtro V

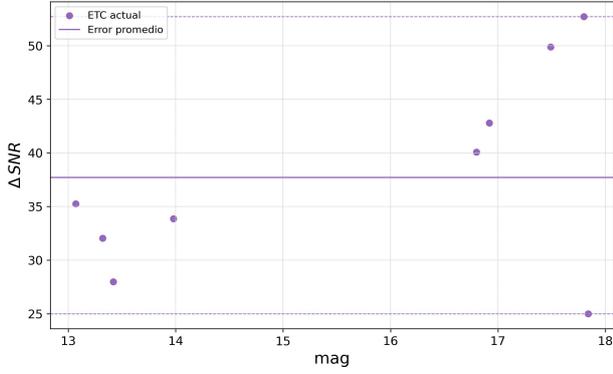


(d) Filtro R

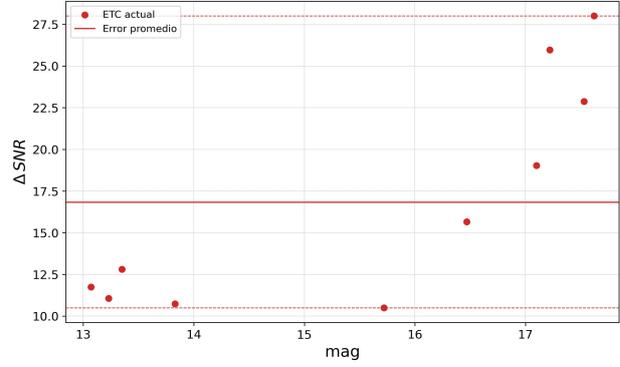


(e) Filtro I

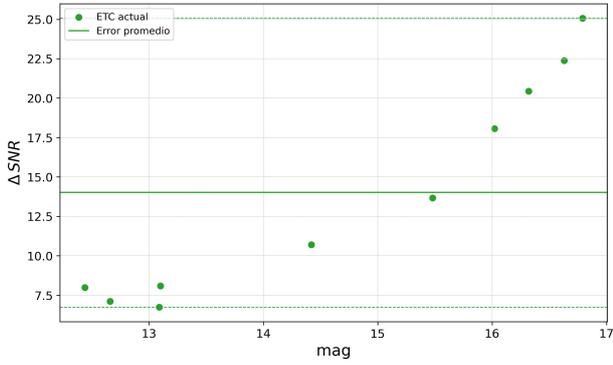
Figura 4.10: Variación del número de cuentas del pico de los objetos observados con CARONTE para cada uno de los filtros UBVRI. Las líneas continuas representan el valor promedio del error cometido y las líneas discontinuas marcan la desviación.



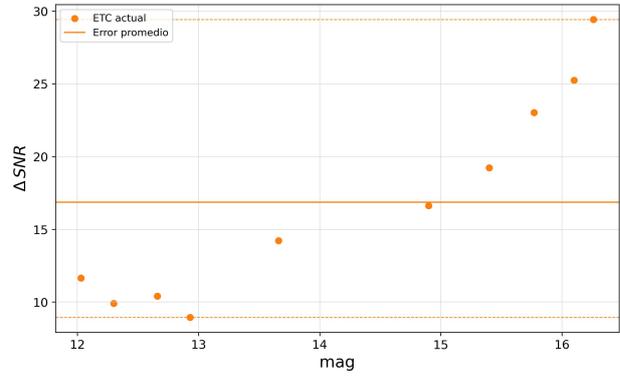
(a) Filtro U



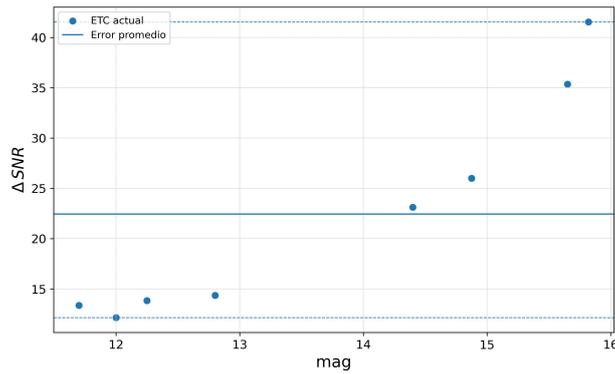
(b) Filtro B



(c) Filtro V



(d) Filtro R



(e) Filtro I

Figura 4.12: Variación de la relación Señal-Ruido de los objetos observados con CARONTE para cada uno de los filtros UBVR I con la ETC antigua (en rojo) y con la ETC actualizada (en azul). Las líneas continuas representan el valor promedio del error cometido y las líneas discontinuas marcan la desviación.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Este trabajo tiene como principal objetivo realizar una actualización de la calculadora de tiempo de exposición de la cámara CAMELOT2 del IAC80, considerando la nueva caracterización de los filtros, la aluminización de los espejos, así como una nueva caracterización de los detectores. Además, se pretende desarrollar una calculadora de tiempo de exposición para la cámara CARONTE, ya que no dispone de una.

Para ello, antes de comenzar a obtener resultados, ha sido necesario realizar un análisis íntegro de la calculadora del ING, comprender su funcionamiento, entender las funciones descritas en ella así como los parámetros definidos, conocer todas las variables que afectan a la hora de calcular tanto el tiempo de exposición como la relación Señal-Ruido, comprender cómo la radiación se ve atenuada desde que se emite de los objetos astronómicos hasta que se recibe en el telescopio debido a cada uno de los componentes del sistema... Este estudio exhaustivo es esencial para verificar que las funciones desarrolladas son correctas y para asegurar que los resultados que se obtienen son adecuados.

Además, con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento de ambas ETC, se dispone de un catálogo de estrellas estándares (Stetson (2000)) cuyas magnitudes aparentes en todos los filtros son conocidas, así como un conjunto de imágenes astronómicas con las que ha sido posible obtener los resultados experimentales para realizar una comparación con los resultados teóricos obtenidos con las ETC.

A continuación se exponen los principales resultados y conclusiones del trabajo:

- La obtención de los parámetros definidos en el código de la ETC es un factor crucial para que los resultados sean correctos.
  - Las características de los filtros Johnson se han obtenido a partir de los datos proporcionados por el investigador del IAC David Nespral. Los valores de la longitud de onda central y del ancho de banda de cada uno de los filtros, se corresponden con los definidos para el sistema fotométrico de Johnson. La transmitancia y eficiencia obtenidas para el filtro U son considerablemente menores que para el resto de filtros, lo que supone que los resultados para el filtro U sean menos precisos.
- El parámetro de ajuste (Truethrough) entre los valores experimentales y teóricos se ha hallado de manera empírica, pues a pesar de que para la cámara CAMELOT2 se ha podido obtener de forma teórica, los valores no eran suficientes para que la relación fuera exacta.
  - Se ha comprobado que el brillo del cielo definido en el código corresponde a los resultados obtenidos durante un período de ciclo solar mínimo, mientras que actualmente nos encontramos en un período donde el ciclo solar es máximo. Esto se ha considerado a la hora de introducir los valores de la magnitud del cielo en la ETC.
  - La eficiencia cuántica del detector también influye en la atenuación de la radiación. Concretamente se ha comprobado que esta es bastante baja en los filtros U e I para la cámara CAMELOT2 y solo en el I para la cámara CARONTE.
- Ha sido preciso emplear imágenes tomadas durante noches fotométricas. De esta forma aseguramos que el valor del coeficiente de extinción no varía significativamente y por tanto, los resultados obtenidos son precisos.
- La selección de fuentes en las imágenes a la hora de obtener los resultados experimentales es otro factor crucial. Ha sido necesario comprobar mediante el software Aladin qué fuentes de las pertenecientes al catálogo estaban dentro del campo de las imágenes. Además, ha sido esencial que la magnitud aparente de las fuentes seleccionadas estuvieran calibradas en el catálogo para cada uno de los filtros, para poder comprobar el funcionamiento de la ETC con ellas.
- El valor de fondo de cielo de la imagen obtenido mediante fotometría como la mediana de todos los píxeles en los que no se encuentra ninguna fuente astronómica, se ha comparado con el obtenido mediante

fotometría de apertura. En ambos casos se obtienen valores similares para cada uno de los filtros y cada una de las cámaras.

Sin embargo, estos valores difieren de los que saca como resultado la calculadora.

Se ha comprobado que tanto el ciclo solar como las coordenadas eclípticas, así como la masa de aire, aumentan el brillo del cielo. Por tanto es posible explicar por qué los valores de magnitud de cielo que se han de introducir en la ETC son menores (es decir, el cielo es más brillante) que los definidos en el código de la ETC para noches oscuras en cada filtro.

- Para comparar los valores teóricos y experimentales, tanto del número de cuentas de los objetos, como del pico, como de la relación Señal-Ruido de cada uno de los filtros para cada una de las cámaras, estos se han representado en función de la magnitud aparente de los objetos. Además, se ha analizado la tendencia del error de cada uno de los resultados obtenidos así como su desviación.
  - El número de cuentas de los objetos experimental se ha calculado mediante fotometría de apertura. Estos resultados se han comparado con los obtenidos con la ETC. Para ambas cámaras, el número de cuentas disminuye conforme aumenta la magnitud aparente de los objetos como es de esperar, pues un objeto más brillante emite una mayor cantidad de fotones que un objeto débil y por tanto, el número de fotones que se recolectan en el telescopio también es mayor.  
Con la cámara CAMELOT2 se observa una mejora con respecto a los valores que se obtienen sin actualizar la ETC. Concretamente el error promedio desciende de un 24.8 % a un 18.15 % en el caso del filtro U, de un 9 % a un 4.12 % para el filtro B, de 13 % a 1.27 % con el filtro V y de un 19.85 % a un 3.13 % para el filtro I. En el caso del filtro R no se aprecia mejora alguna pero el error promedio que se comete es del 1.27 %.  
En el caso de la ETC de CARONTE no es posible comparar los resultados; sin embargo, el error promedio cometido entre el número de cuentas experimental y teórico es del 30.4 %, 3.32 %, 3.5 %, 17 % y 4.65 % para los filtros U, B, V, R e I respectivamente. Lo que supone un ajuste bastante preciso, teniendo en cuenta que para el filtro U los errores esperados son mayores debido a su baja transmitancia y su reducido ancho de banda.
  - El número de cuentas del pico experimental se ha adquirido mediante el algoritmo DAOFIND. Se ha comparado con el resultante de utilizar la ETC y se ha comprobado que en ambos casos y para ambas cámaras se tiene una tendencia decreciente en función de la magnitud de los objetos, como era de esperar.  
El error promedio que se obtiene con CAMELOT2 desciende para todos los filtros con la actualización de la ETC. Concretamente, para el filtro U desciende de 19 % a 16.5 %, para el B pasa de ser un 12 % a ser 7.6 %, en el caso del filtro V mejora al cambiar de un 19 % a únicamente 2.8 %, con el filtro R el error disminuye del 8 % al 6 % y con el I del 23.6 % al 11.17 %. En todos los casos el error promedio está entorno a 15 % o menos, por lo que se consideran óptimos los resultados.  
Con CARONTE los errores que se generan son ligeramente superiores que con CAMELOT, pero con todos los filtros, exceptuando el filtro U, se tiene un error menor al 15 %: 12.75 % para el filtro B, 8.1 % para el V, 14.6 % en el caso del R y 14.18 % con el I. Por lo tanto, se considera que los resultados obtenidos son bastante precisos.
  - La relación Señal-Ruido que se obtiene tanto de manera experimental como teórica con la ETC disminuye conforme a la magnitud del objeto al igual que el número de cuentas y el pico.  
Además, para ambas cámaras, el error que se comete aumenta para objetos más débiles (con una mayor magnitud aparente), lo cual tiene sentido pues el ruido que se genera está más presente para objetos menos brillantes.  
En el caso de CAMELOT2 generalmente se observa una mejora con respecto a la ETC desactualizada. Concretamente el error promedio desciende de un 12.5 % a un 11 % con el filtro U, de 5.2 % a 3.3 % para el filtro B, pasa de ser un 7.5 % a 1.5 % con el V, aumenta sutilmente para el R de un 1.5 % a un 1.76 % y presenta un descenso del 13.4 % al 3.2 % en el caso del filtro I.  
Con CARONTE los errores promedio que se cometen, ligeramente superiores, están próximos a un 15-20 % exceptuando el filtro U cuyo error es notablemente mayor.

En general, en el caso de CAMELOT2 los resultados que se obtienen presentan errores menores que los que se consiguen con la ETC sin actualizar, por lo que se considera una mejora considerable. En el caso de CARONTE, a pesar de que no es posible comparar con valores anteriores, los resultados obtenidos demuestran el buen desarrollo de la ETC. Aún así, se recomienda realizar un análisis más minucioso para objetos observados con el filtro U pues los errores que se cometen con él son significativamente más elevados que con el resto de filtros.

En cualquier caso se considera que se cumple con los objetivos presentados en este trabajo.

## 5.1 Trabajo Futuro

Basándonos en los resultados obtenidos, se exponen varias propuestas para futuras investigaciones:

- Medición del brillo de fondo de cielo en el Observatorio del Teide: Se sugiere realizar mediciones más precisas del fondo de cielo para mejorar la calidad de los datos fotométricos y asegurar el valor de la magnitud aparente para cada uno de los filtros del IAC80 tanto para noches oscuras, como para noches grises y brillantes.
- Verificación del funcionamiento de la ETC para objetos observados con los filtros estrechos: además de los filtros Johnson que se han utilizado en este trabajo, para el IAC80 están disponibles los filtros de Sloan. Sería interesante actualizar los parámetros definidos en el código de la ETC para estos filtros.
- Observaciones de objetos extensos: La ETC permite la elección entre objeto puntual y objeto extenso. Por tanto, sería útil comprobar el correcto funcionamiento de la ETC para este tipo de objetos.
- Aplicación a otros telescopios: Se propone extender el desarrollo de esta herramienta y adaptarla a otros telescopios como por ejemplo el Telescopio Carlos Sánchez, de forma que se beneficie a un mayor número de investigadores a la hora de realizar observaciones.

# Capítulo A

## Anexo

### A.1 CAMELOT2

#### A.1.1 Resultados Flujo del objeto

Fuente	U		B		V		R		I	
	$N_{*,exp}$	$N_{*,ETC}$								
N6940-S61	1375.29	1694.93	6759.64	16895.95	33649.29	34017.23	54918.51	54943.61	77512.58	76466.83
N6940-S154	297.25	368.77	3195.29	3309.65	6148.02	6190.12	9325.74	9287.89	12457.91	11788.89
N6940-S41	53.90	65.16	607.63	636.48	1417.332	1444.44	2416.6695	2488.38	3583.28	3495.21
N6940-S56	5.37	6.9	45.72	59.67	137.12	141.81	251.89	260.57	424.88	408.76
N6940-S35	1043.2449	1254.15	12742.15	13115.43	23327.18	23534.17	4537.45	34667.08	44101.69	43598.65
N6940-S161	851.69	1036.46	9914.14	9903.36	18692.72	18522.47	28181.10	27791.83	37810.27	35601.89
N6940-S57	751.22	900.22	8698.14	8785.82	16041.57	16132.4	24105.28	24205.68	31570.74	31294.87
N6940-S50	129.38	164.12	1520.76	1540.93	3367.15	3433.2	5667.00	5753.3	8359.13	8231.39
N6940-S88	1097.09	1308.43	12902.72	13055.17	22974.68	23104.62	33224.46	33106.8	43244.7	42021.65
N6940-S176	619.50	731.73	7050.81	7240.73	13055.75	12932.99	18733.61	18361.88	23604.15	22463.28

Tabla A.1: Valores del flujo experimental  $N_{*,exp}$  y teórico  $N_{*,ETC}$  de los objetos en unidades de  $[e^-/s]$  con cada uno de los filtros y con la cámara CAMELOT2.

#### A.1.2 Resultados Pico del objeto

Fuente	U		B		V		R		I	
	$P_{*,exp}$	$P_{*,ETC}$								
N6940-S61	22399.07	27971.24	50148.84	49609.41	58051.67	61313.84	142089.99	146623.39	152593.15	157417.96
N6940-S154	4643.69	6085.72	9324.44	9717.71	10715.26	11157.29	23063.43	24785.82	25415.22	24269.13
N6940-S41	931.99	1075.26	2057.76	1868.81	2640.48	2603.51	7418.64	6640.54	8309.86	7195.39
N6940-S56	122.88	113.95	245.12	175.21	278.15	255.6	828.21	695.35	1325.89	841.5
N6940-S35	17931.60	20697.21	39761.66	38509.16	42929.72	42418.81	96230.12	92513.11	99230.50	89754.09
N6940-S161	13600.04	17104.55	28830.91	29077.97	34192.82	33385.55	72829.19	74165.73	77667.87	73291.61
N6940-S57	12842.57	14856.34	26888.96	25796.69	29663.54	29077.6	65791.40	64595.65	66865.11	64424.98
N6940-S50	2259.07	2708.39	4910.73	4524.43	6111.74	6188.12	15873.08	15353.35	18173.97	16945.5
N6940-S88	17562.66	21592.94	37671.95	38332.23	41732.75	41644.58	82686.52	88349.33	88698.44	86507.6
N6940-S176	9899.72	12075.68	20723.31	21260.04	23630.60	23310.87	47131.26	49000.81	46576.31	46243.88

Tabla A.2: Valores del pico experimental  $P_{*,exp}$  y teórico  $P_{*,ETC}$  de los objetos en unidades de  $[e^-]$  con cada uno de los filtros y con la cámara CAMELOT2.

#### A.1.3 Resultados S/N

Fuente	U		B		V		R		I	
	$SNR_{exp}$	$SNR_{ETC}$								
N6940-S61	825.92	904.18	1291.81	1297.50	1417.57	1426.10	1812.05	1813.71	1860.28	1852.46
N6940-S154	378.53	424.47	558.99	570.05	599.70	603.53	740.38	741.80	730.94	721.97
N6940-S41	149.52	169.63	233.05	240.97	276.60	282.73	366.39	377.54	371.02	385.22
N6940-S56	29.61	39.19	42.11	54.28	61.82	67.68	92.43	103.71	88.42	110.28
N6940-S35	718.43	789.18	1125.63	1142.56	1179.07	1185.24	1435.51	1439.78	1399.04	1397.34
N6940-S161	648.36	716.91	992.09	992.10	1054.59	1050.76	1295.89	1288.58	1293.94	1262.03
N6940-S57	608.40	667.72	928.79	934.08	976.27	980.15	1197.83	1202.20	1180.50	1182.75
N6940-S50	244.11	279.22	381.03	384.98	439.28	446.03	573.40	581.59	591.96	601.02
N6940-S88	736.93	806.19	1132.74	1139.92	1170.07	1174.32	1407.80	1406.89	1385.19	1371.71
N6940-S176	551.64	601.34	835.43	847.35	879.76	876.78	1054.76	1046.26	1017.47	1000.75

Tabla A.3: Valores de la relación Señal-Ruido experimental  $SNR_{*,exp}$  y teórica  $SNR_{*,ETC}$  de los objetos con cada uno de los filtros y con la cámara CAMELOT2.

## A.2 CARONTE

### A.2.1 Resultados Flujo del objeto

Fuente	U		B		V		R		I	
	$N_{*,exp}$	$N_{*,ETC}$								
N6633-S111	366.97	680.67	4889.88	5064.40	6976.50	6715.39	6976.50	6944.25	3691.06	3767.25
N6633-S145	7.97	10.90	147.80	143.39	291.59	304.14	291.59	399.60	242.74	266.70
N6633-S314	20.87	27.60	545.20	511.13	1337.39	1327.61	1337.39	1984.38	-	-
N6633-S320	422.76	856.91	5687.03	5868.51	8542.81	8223.78	8542.81	8904.83	4756.12	4966.21
N6633-S316	202.67	370.63	2881.03	2914.26	4612.68	4477.87	4612.68	4984.55	2880.48	2992.44
N6633-S159	8.15	10.59	99.21	96.50	173.46	173.41	173.46	209.71	134.18	130.62
N6633-S167	380.18	554.81	4273.68	4534.49	4832.11	4519.30	4832.11	3887.10	1773.26	1803.12
N6633-S134	20.58	24.71	266.24	256.17	505.80	500.12	505.80	633.32	425.32	413.07
N6633-S321	15.96	14.62	130.83	128.39	238.00	230.71	238.00	284.20	-	-
N6633-S147	80.69	15.59	90.11	88.82	137.22	149.65	137.22	180.98	99.52	111.69

Tabla A.4: Valores del flujo experimental  $N_{*,exp}$  y teórico  $N_{*,ETC}$  de los objetos en unidades de  $[e^-/s]$  con cada uno de los filtros y con la cámara CARONTE.

### A.2.2 Resultados Pico del objeto

Fuente	U		B		V		R		I	
	$P_{*,exp}$	$P_{*,ETC}$								
N6633-S111	6612.80	11824.62	19372.55	22545.51	17796.35	17937.20	17018.20	18548.49	6927.67	7984.32
N6633-S145	143.64	190.89	628.29	638.35	786.41	812.37	951.81	1067.35	577.92	565.25
N6633-S314	459.30	479.50	2311.01	2275.41	3511.10	3546.13	4599.07	5300.40	-	-
N6633-S320	7327.03	14886.31	19847.73	26125.22	19841.46	21966.19	19465.91	23785.30	8976.68	10525.39
N6633-S316	3625.88	6438.54	10888.28	12973.59	10968.00	11960.65	12042.73	13314.00	5529.60	6342.17
N6633-S159	82.05	183.99	449.29	429.60	505.79	463.19	565.26	560.16	313.01	276.85
N6633-S167	6950.28	10784.18	15359.30	20186.45	11355.91	12071.32	9008.72	10382.66	2966.58	3821.54
N6633-S134	268.11	429.33	921.43	1140.41	1159.91	1335.84	1254.78	1691.64	635.66	875.46
N6633-S321	148.79	253.97	502.12	571.56	475.31	616.25	518.26	759.12	-	-
N6633-S147	133.05	270.89	354.24	395.42	371.82	399.72	414.33	483.40	254.79	236.72

Tabla A.5: Valores del pico experimental  $P_{*,exp}$  y teórico  $P_{*,ETC}$  de los objetos en unidades de  $[e^-]$  con cada uno de los filtros y con la cámara CARONTE.

### A.2.3 Resultados S/N

Fuente	U		B		V		R		I	
	$SNR_{exp}$	$SNR_{ETC}$								
N6633-S111	394.98	581.17	631.41	709.97	587.88	632.85	579.72	643.39	359.77	409.40
N6633-S145	28.89	61.09	89.76	110.86	103.96	126.88	118.54	146.75	75.21	101.65
N6633-S314	64.59	107.78	197.79	220.97	248.27	278.02	292.66	341.18	-	-
N6633-S320	422.61	652.59	674.69	764.51	644.76	700.72	644.19	729.10	407.89	470.70
N6633-S316	282.81	427.50	479.91	537.64	474.24	516.00	487.74	544.41	313.95	364.35
N6633-S159	44.73	59.62	67.84	87.96	71.26	91.82	76.05	101.72	42.99	66.49
N6633-S167	399.59	554.81	585.61	671.62	483.51	518.41	437.25	480.15	241.11	281.51
N6633-S134	57.82	101.06	129.11	153.07	143.82	166.60	157.03	188.32	99.76	129.74
N6633-S321	36.82	73.45	77.02	104.04	86.33	108.50	93.36	121.28	-	-
N6633-S147	31.94	76.48	60.23	83.66	62.97	84.04	65.77	93.19	35.20	60.23

Tabla A.6: Valores de la relación Señal-Ruido experimental  $SNR_{*,exp}$  y teórica  $SNR_{*,ETC}$  de los objetos con cada uno de los filtros y con la cámara CARONTE.

# Bibliografía

- M. R. Alarcon, M. Serra-Ricart, S. Lemes-Perera, and M. Mallorquín. Natural night sky brightness during solar minimum. *The Astronomical Journal*, 162(1):25, June 2021. ISSN 1538-3881. doi: 10.3847/1538-3881/abfdaa. URL <http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/abfdaa>.
- Astronomics. Blooming. URL <https://www.astronomics.com/info-library/astronomical-terms/blooming/>.
- M. S. Bessell. UBVRI photometry II: the Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry. , 91:589–607, Oct. 1979. doi: 10.1086/130542. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979PASP...91..589B>.
- M. S. Bessell. Standard Photometric Systems. , 43(1):293–336, Sept. 2005. doi: 10.1146/annurev.astro.41.082801.100251. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005ARA&A...43..293B>.
- J. Casas Peláez. *Optica*. 7<sup>a</sup> ed., 2<sup>a</sup> reimp. edition, 2008.
- Chris Benn, Robert Greimel, Javier Méndez. Exposure time calculator – SIGNAL. URL <http://catserver.ing.iac.es/signal/>.
- Chris R. Benn, Sara L. Ellison. La palma night-sky brightness, a. URL <https://www.ing.iac.es/Astronomy/observing/conditions/skybr/skybr.html>.
- Chris R. Benn, Sara L. Ellison. La palma night-sky brightness, b. URL <https://www.ing.iac.es/Astronomy/observing/conditions/#sky>.
- V. Dillhon. Observational astronomy. URL <https://slittlefair.staff.shef.ac.uk/teaching/phy241/index.html>.
- H. W. Duerbeck. *Principles of Photometry*, pages 205–238. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-76379-6. doi: 10.1007/978-3-540-76379-6\_8. URL [https://doi.org/10.1007/978-3-540-76379-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76379-6_8).
- IAC. CAMELOT2, a. URL <https://research.iac.es/00CC/iac-managed-telescopes/iac80/camelot2-2/>.
- IAC. CARONTE, b. URL <https://research.iac.es/00CC/caronte/>.
- IAC. ETC CAMELOT2, c. URL <https://research.iac.es/00CC/iac-managed-telescopes/iac80/camelot/camelot-snr-calculator/>.
- IAC. IAC80, d. URL <https://research.iac.es/00CC/iac-managed-telescopes/iac80/>.
- IAC. Observatorio del Teide, e. URL <https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/observatorio-del-teide>.
- IAC. Eficiencia cuántica CAMELOT2, f. URL [https://research.iac.es/00CC/wp-content/uploads/instruments/IAC80CCD/QE\\_ccd.gif](https://research.iac.es/00CC/wp-content/uploads/instruments/IAC80CCD/QE_ccd.gif).
- IAC. Eficiencia cuántica CARONTE, g. URL [https://research.iac.es/00CC/wp-content/uploads/instruments/CARONTE/QE\\_caronte.png](https://research.iac.es/00CC/wp-content/uploads/instruments/CARONTE/QE_caronte.png).
- T. P. Instruments. Excellence in spectroscopy and imaging. URL <https://www.princetoninstruments.com/>.
- Isaac Newton Group of Telescopes. Site quality - extinction. URL <https://www.ing.iac.es/astronomy/observing/conditions/#sky>.
- A. Knudby. Teledetección. URL [https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geograf%C3%ADa\\_\(F%C3%ADsica\)/Teledetecci%C3%B3n\\_\(Knudby\)](https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geograf%C3%ADa_(F%C3%ADsica)/Teledetecci%C3%B3n_(Knudby)).
- Photutils Developers. Aperture photometry. URL <https://photutils.readthedocs.io/en/stable/aperture.html>.
- S. Lamolda Mir. Código análisis experimental. URL <https://github.com/Sofialamolda/Codigo-Experimental-.git>.

- SEA. Glosario astronómico. URL <https://www.sea-astronomia.es/glosario/monturas-de-telescopios>.
- SpaceWeatherLive. Progresión del ciclo solar. URL <https://www.spaceweatherlive.com/es/actividad-solar/ciclo-solar.html>.
- P. B. Stetson. Homogeneous Photometry for Star Clusters and Resolved Galaxies. II. Photometric Standard Stars. , 112(773):925–931, July 2000. doi: 10.1086/316595. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000PASP..112..925S>.
- F. G. Témich. Documentación interna IAC80.