

EVALUACIÓN DE HERRAMIENTAS DE FOTOMETRÍA PARA EL SEGUIMIENTO TERRESTRE DE PLATO

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Física

Curso 2023/24



Autor:

Óscar Bermell Martínez

Tutor:

Hans-Jörg Deeg

Agradecimientos

La redacción de este trabajo simboliza el final de una etapa de 5 años en mi vida. Etapa en la cual he evolucionado, madurado, alcanzado metas y aprendido muchísimo, pero nada de esto hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas.

La primera y, sin duda, la más importante de todas, ha sido mi padre, Santiago. Papá, sin tu apoyo sin negociaciones ni condiciones, desde el primer momento, nada de esto habría sido posible.

Tampoco puedo dejarme sin mencionar a los compañeros que, en las tres universidades, me han acompañado y hecho un poco más fácil y llevadera esta carrera, gracias a todos. En especial a Jorge, quien me ha acompañado desde el primer año. A mis compañeros de la UV, Andreu, Lea, Leyre, Lucia, Mariola, Ana, Joseal y Saúl, sin vosotros las sesiones de estudio y días en el campus hubieran sido muy diferentes. A mis compañeros en la ULL, Josep, Kevin, María, Mónica, Raúl, Shasha y, especialmente a Cristina, gracias por hacerme sentir uno más y ayudarme en la adaptación en esta etapa en la isla.

Y, también, a mis compañeros de piso Julen y Maialen con quienes he compartido frustraciones, risas, bromas y sustos, y que me han hecho ver el camino que quiero seguir en los próximos años.

Por último, también agradecer a los profesores que han hecho más fácil seguir aprendiendo y descubriendo. En especial a Hans, el tutor de este trabajo, por confiar en mi y guiarme para completar este proyecto.

Resumen

For the PLATO exoplanet detection mission, a ground based photometric follow-up will be required using telescopes of all sizes, with a strong involvement of both the professional and the amateur community. For this effort, several software packages are under consideration to perform the time-series photometry of the ground data that will be acquired.

The purpose of this project is to evaluate four of these packages by installing and running them on sample data. More specifically: AstroImageJ, Siril, C-Munipack and SIPS. The task is then an evaluation of these packages along several parameters: Ease of installation, comprehensivity of the documentation, suitability of the package for the required task, quality of the output data. Also to get a deeper insight into the objectives and methods of the PLATO space mission, into the details of stellar differential photometry, and into the user-centered design of scientific software and the requirements to produce documentation of quality of such software.

Keywords: Exoplanets, Astronomy software, Photometry, PLATO Mission, AstroImageJ, Siril, C-Munipack, SIPS

Para la misión PLATO de detección de exoplanetas, se requerirá de un seguimiento fotométrico terrestre utilizando telescopios de todos los tamaños, con una fuerte implicación de la comunidad tanto profesional como amateur. Para tal esfuerzo, están siendo considerados varios paquetes de software para la realización de la fotometría en series temporales de los datos terrestres que se adquirirán.

El propósito de este proyecto es evaluar cuatro de estos paquetes instalándolos y ejecutándolos con datos de muestra. Más concretamente: AstroImageJ, Siril, C-Munipack y SIPS. El objetivo es, entonces, una evaluación empleando varios parámetros: facilidad de instalación, exhaustividad de la documentación, idoneidad del paquete para la tarea requerida, calidad de los datos de salida. Además de obtener una comprensión más profunda de los métodos y objetivos de la misión espacial PLATO, de los detalles de la fotometría diferencial estelar, así como del diseño centrado en el usuario de software científico y los requisitos para producir documentación de calidad de dicho software.

Palabras clave: Exoplanetas, Software de Astronomía, Fotometría, Misión PLATO, AstroImageJ, Siril, C-Munipack, SIPS

Índice

1. Misión PLATO	4
1.1. Objetivos de la misión	4
1.2. Características técnicas	4
1.3. Detección y caracterización de los exoplanetas	5
1.4. Método de tránsitos	5
1.5. Importancia del seguimiento terrestre o <i>ground follow-up</i>	6
1.6. Identificación de las falsas alarmas	7
1.6.1. Condición de falsa alarma	8
1.7. Programa de seguimiento terrestre	9
2. Proceso de evaluación	10
2.1. Proceso de instalación	11
2.2. Acceso y calidad de la documentación	11
2.3. Interfaz de usuario	11
2.4. Resultados	11
2.5. Ponderación de las categorías	11
3. AstroImageJ	12
3.1. Proceso de instalación	12
3.2. Acceso y calidad de la documentación	12
3.3. Interfaz de usuario	13
3.4. Resultados	14
4. Siril	19
4.1. Proceso de instalación	20
4.2. Acceso y calidad de la documentación	20
4.3. Interfaz de usuario	20
4.4. Resultados	21
5. C-Munipack	24
5.1. Proceso de instalación	24
5.2. Acceso y calidad de la documentación	24
5.3. Interfaz de usuario	25
5.4. Resultados	26
6. SIPS	29
6.1. Proceso de instalación	29
6.2. Acceso y calidad de la documentación	29
6.3. Interfaz de usuario	30
6.4. Resultados	30
7. Comparativa de los resultados y conclusiones	33
A. Anexo	40

1. Misión PLATO

This first section, as an introduction to the context of the study, details the PLATO mission, its objectives and the importance of ground follow-up. This is a mission of the European Space Agency, ESA, for the detection of exoplanets, consisting of a satellite to be launched in 2026. Exoplanets will be detected using the most prolific method of detection: the transit method. This method is the simplest and most effective way to achieve this, but it can generate false alarms, in the form of CEB (Contaminating Eclipsing Binaries) in the satellite aperture. This is why a check of the data with ground observations is necessary to obtain robust results.

1.1. Objetivos de la misión

La misión PLATO (PLANetary Transits and Oscillations off stars) de la Agencia Espacial Europea (o ESA, por sus iniciales en inglés, y a partir de ahora en este texto) tiene como objetivo principal descubrir y estudiar sistemas planetarios extrasolares. Enfocándose principalmente en planetas similares a la Tierra en la zona habitable alrededor de estrellas similares al Sol (Rauer and Heras, 2018; Rauer et al., 2014, 2024). El objetivo es caracterizar las propiedades de estos exoplanetas y de sus estrellas anfitrionas, incluida su masa, radio, edad y composición.

La misión detectará y caracterizará los exoplanetas mediante los tránsitos fotométricos. Para ello se realizará el seguimiento de un gran número de estrellas en la parte visible del espectro de luz.

1.2. Características técnicas

El satélite, el cual se espera que sea lanzado en el año 2026 y durante los primeros dos años va a observar continuamente un campo en el hemisferio sur (Figura 1), cuenta con un total de 26 cámaras las cuales poseen una apertura de 12 cm, 24 de ellas con una cadencia de lectura de 25 s, y 2 cámaras rápidas con una cadencia de lectura de 2.5 s, para las estrellas más brillantes. La posición de las mismas se puede ver en la representación del satélite en la Figura 2. Estas cámaras se encuentran ordenadas en grupos de seis de tal forma que sus campos de visión se ven parcialmente solapados, proporcionando así un campo visual de 2232 deg^2 , cubierto en todos los puntos. También contará con un tamaño de píxel en forma de cuadrado de $15''$ y con una resolución espacial similar (Rauer et al., 2014, 2024).

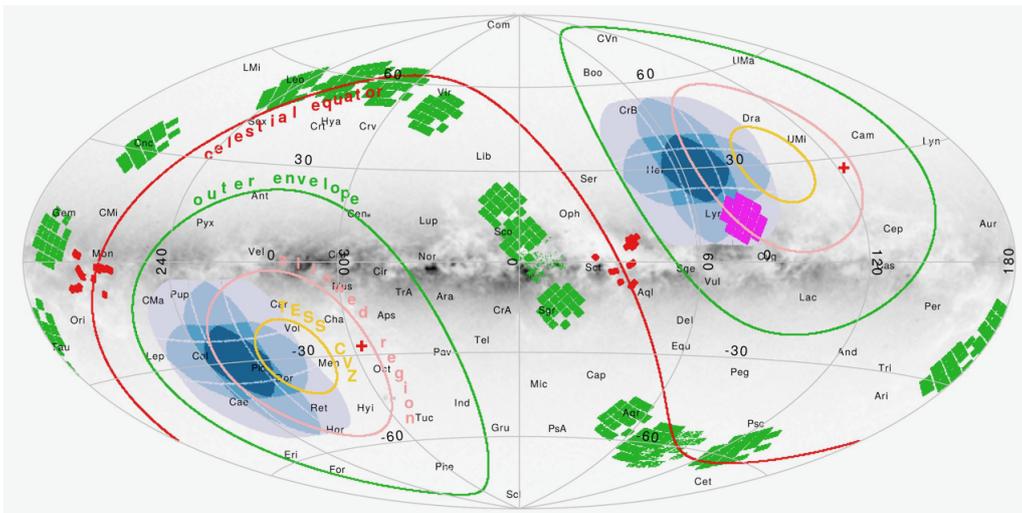


Figura 1: Ilustración de los FoVs (*Fields of View*, en inglés) de PLATO, en azul, en comparación con los de las misiones: Kepler en rosa, K2 en verde, y CoRoT en rojo. La posición de los campos de PLATO es de carácter únicamente orientativo. Imagen extraída de Rauer et al. (2024)

Debido a estas especificaciones técnicas se espera que haya una contaminación significativa en los datos recolectados de los candidatos a planeta, debido a la presencia de sistemas de binarias eclipsantes dentro de las mismas aperturas fotométricas.

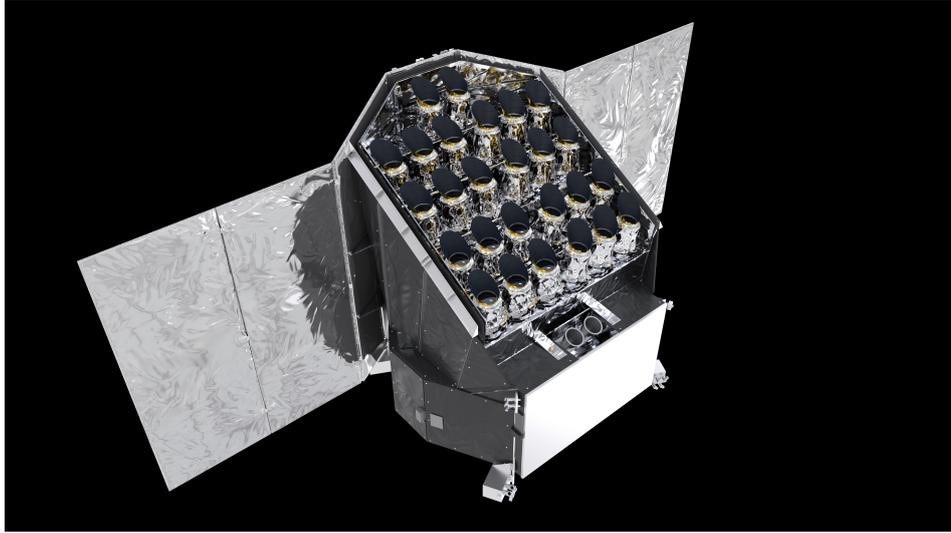


Figura 2: Representación del satélite de la misión PLATO. Imagen extraída de: ©ESA. (ESA, 2022)

1.3. Detección y caracterización de los exoplanetas

El objetivo es proporcionar, por tanto, un catálogo con un gran número de exoplanetas precisamente caracterizados por sus parámetros principales: masa, radio y edad.

Para ello se emplearán las siguientes técnicas:

- Análisis de las curvas de luz fotométricas de tránsitos obtenidas por PLATO, para obtener el radio de los planetas.
- Espectroscopia de seguimiento terrestre (o en inglés: *ground based follow-up photometry*, término que aparecerá con frecuencia) de la velocidad radial (RV), para la estimación de la masa.
- Análisis astrosísmico de las estrellas, empleando las curvas fotométricas proporcionadas por PLATO, para determinar la edad de las estrellas (y de los planetas si los hubiese).

Estos datos se proporcionarán para un amplio número de planetas en diferentes órbitas alrededor de diferentes tipos de estrellas. Focalizándose en planetas terrestres en la zona habitable de estrellas brillantes de tipo solar (F5 a K7), aunque también serán objeto de estudio estrellas de tipo M (Rauer and Heras, 2018).

1.4. Método de tránsitos

El método de tránsitos es el método por el cual más exoplanetas han sido descubiertos hasta la fecha, y el que será empleado principalmente en la misión PLATO.

Este se basa en el hecho de que al pasar un planeta entre la estrella que orbita y el observador oculta parcialmente la luz de la estrella. Este método sólo funciona si el observador está alineado con el plano orbital del planeta en cuestión (Perryman, 2018; Deeg and Alonso, 2018).

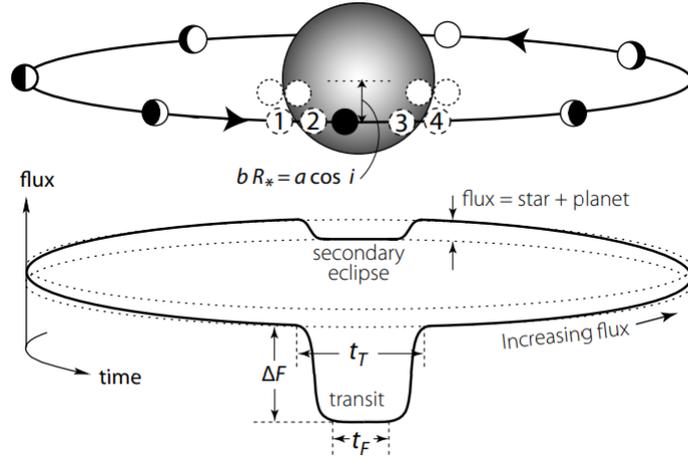


Figura 3: Esquema de un tránsito. Imagen extraída de: *The Exoplanet Handbook* (Perryman, 2018)

Hay cuatro observables que caracterizan la duración y el perfil de un tránsito, apareciendo algunos de ellos representados en la Figura 3:

- Periodo, P .
- Profundidad del tránsito, ΔF .
- Intervalo entre el primer y el cuarto contacto, t_T .
- Intervalo entre el segundo y el tercer contacto, t_F .

Suponiendo que el flujo del planeta es despreciable y que la forma de la estrella y el planeta se puede considerar esférica, la variación del flujo viene dado por el cociente de las áreas del planeta y la estrella:

$$\frac{R_p}{R_s} \approx \sqrt{\frac{\Delta F}{F}} \quad (1)$$

Donde R_p es el radio del planeta y R_s el de la estrella la cual orbita (Deeg and Alonso, 2018). Para la obtención de R_p es fundamental conocer R_s , el cual se obtiene de caracterizaciones del tipo espectral: temperatura, distancia, brillo absoluto, etc. de la estrella.

1.5. Importancia del seguimiento terrestre o *ground follow-up*

Una parte fundamental de la misión PLATO consiste en un programa de seguimiento terrestre de las observaciones, que emplea espectroscopía y fotometría de tiempo crítico (en inglés *time-critical photometry*). La principal función de este seguimiento es conseguir discernir entre el gran número de candidatos a exoplanetas detectados al estudiar los tránsitos, cuales se tratan realmente de exoplanetas y cuales son otros fenómenos astrofísicos de distinta naturaleza, llamados en conjunto “falsos positivo” o “alarmas falsa” (también “falsas alarmas”, por la flexibilidad del lenguaje); por su connotación de ahora en adelante se empleará el segundo término, ya que el primero puede inducir a error por hacer uso de la palabra positivo.

Este proceso consta, principalmente, de una re-observación de los candidatos desde telescopios terrestres con una mayor resolución, pero un mucho menor campo de observación y, típicamente, menor precisión fotométrica. También puede incluirse en este análisis posterior las observaciones fotométricas multicolor o el seguimiento de las Variaciones Temporales de Tránsito (TTVs por sus siglas en inglés) para verificar un candidato determinado (Deeg and Alonso, 2024).

1.6. Identificación de las falsas alarmas

La mayor fuente de falsos positivos para las detecciones de exoplanetas con el método de los tránsitos son los sistemas de estrellas binarias eclipsantes (Brown, 2003), como lo fueron entonces para las misiones espaciales predecesoras en este campo: CoRoT de la CNES, Kepler y Kepler K2 de la NASA así como el satélite TESS, también de la NASA.

La binarias eclipsantes (conocidas como EB en inglés) son sistemas conformados por dos estrellas que se orbitan mutuamente y que, al estar alineado el plano de su órbita con el de observación, provocan eclipses periódicos al ser observadas desde la Tierra.

Las EB cercanas a una estrella “target” (objetivo de estudio, y como aparecerá a partir de ahora en este documento) son la mayor fuente de falsos positivos debido a que el cambio de brillo debido a uno de sus eclipses puede inducir una variación del brillo total en la apertura fotométrica del detector, con una apariencia similar a la del tránsito de un planeta alrededor del target, haciendo que se detecte un posible tránsito, cuando este no existe.

En la literatura estos fenómenos aparecen asiduamente con diferentes nombres, que refieren al mismo suceso, como pueden ser:

- **NEB:** Nearby Eclipsing Binary.
- **BEB:** Blended (o Background) Eclipsing Binaries.
- **CEB:** Contaminating Eclipsing Binaries.

Para unificar el criterio, en este estudio se aludirá a ellas como CEB, debido a que es un término menos ambiguo.

Las CEB son un objeto preocupante en este estudio, pues son las que mayor probabilidad tienen de ser confundidas con el tránsito de un planeta delante de una estrella target de PLATO. Y al ser un evento periódico y no excepcional, puede contaminar los resultados.

Para ilustrar este suceso se toman como ejemplo imágenes extraídas de un análisis de datos de la misión CoRoT de la Agencia Espacial Francesa, CNES (Deeg et al., 2009). Se selecciona CoRoT por su gran parecido al caso de PLATO, de la cual, y hasta que sea lanzada, no hay imágenes.

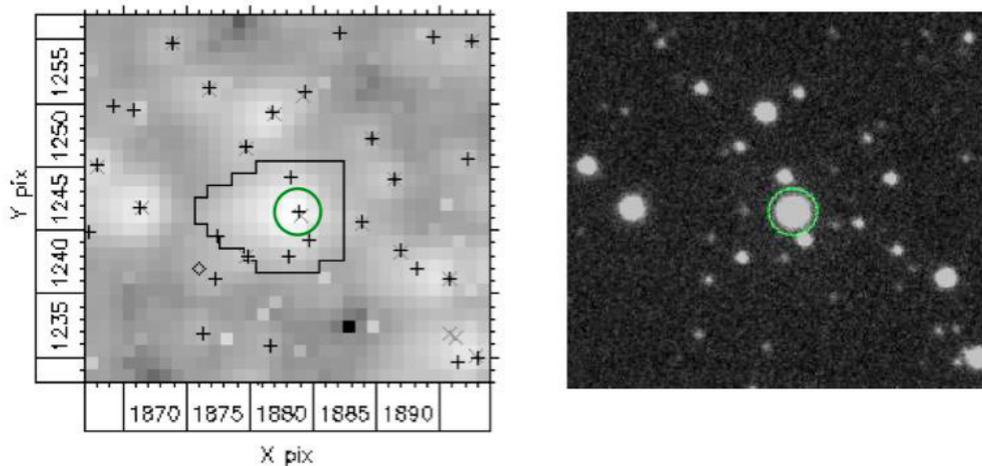


Figura 4: *Izquierda:* sección de un campo objetivo de CoRoT alrededor de una estrella target, rodeada en verde, como se obtiene del satélite. El contorno en negro indica la forma de la apertura fotométrica y las cruces las posiciones de las estrellas

Derecha: mismo campo; el target está indicado con el círculo verde. La imagen se obtuvo con la cámara CCD del telescopio IAC80cm, en Tenerife (Deeg et al., 2009). En esta imagen, varias estrellas cercanas al target aparecen claramente diferenciadas

En la Figura 4, la imagen de la izquierda corresponde a la sección de un campo objetivo de CoRoT alrededor del target, en este caso la estrella LRC01_E1_2376, tal cual era proporcionada por el satélite, con una resolución aproximada de $20''$. Esta sección tiene un tamaño aproximado de $1'$. Y a fines comparativos se proporciona una imagen de la misma sección del cielo tomada por la cámara CCD del telescopio IAC80cm, con una resolución de aproximadamente $1.5''$. Todas las estrellas contenidas en la base de datos Exo-Dat (Deleuil et al., 2009) están marcadas con cruces. Se observa como varias estrellas contaminantes caen dentro de la apertura del objetivo.

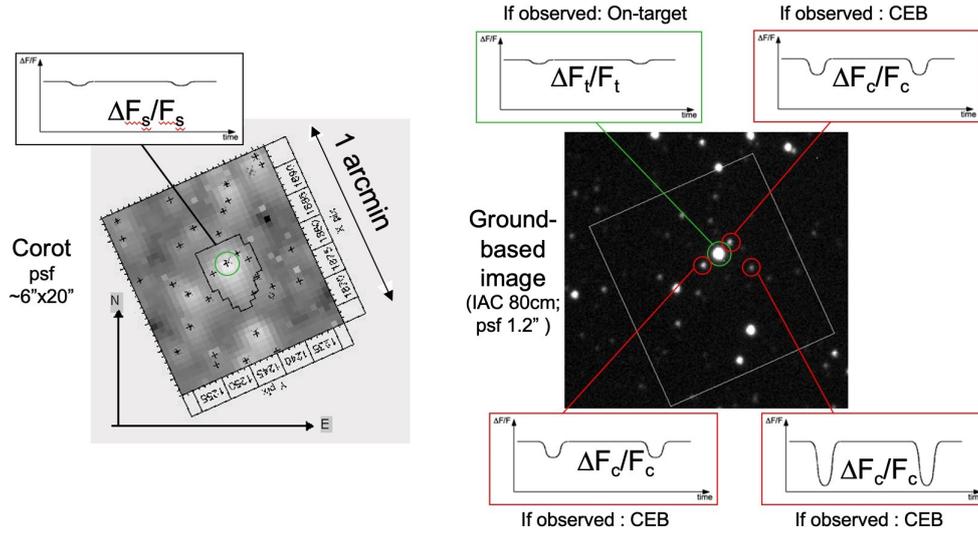


Figura 5: *Izquierda*: resultados obtenidos si sólo se dispone de los datos de CoRoT
Derecha: análisis tomando en cuenta datos proporcionados por el seguimiento terrestre, en el cual se mide el brillo de las estrellas contaminantes (círculos rojos) por separado

Este caso es representativo, pues si se mide el flujo del target dentro de la apertura de CoRoT, se observa una variación periódica prácticamente igual a la de un tránsito, pero no hay un planeta orbitando esta estrella. Lo que ocurre en este caso es que el target tiene a su alrededor, y todavía en la zona de la apertura de CoRoT, varias CEB que alteran la medida (Figura 5).

Los tránsitos suelen estar comprendidos, en términos de la variación del flujo, en valores entre el 0.03% , si es un caso como la Tierra eclipsando al Sol, hasta $\sim 2\%$ para un planeta similar a Júpiter orbitando una estrella de la secuencia principal. A partir del $3 - 5\%$ se descarta un posible tránsito, salvo casos excepcionales como estrellas M. En este contexto, los eclipses de las CEB suelen ser muy profundos (de hasta el 50% , fáciles de observar si están alejados del target), lo que puede provocar una variación del flujo en la apertura del satélite del orden de 1% o menos, generando una falsa alarma. Como se puede ver en el ejemplo anterior analizado en la Figura 5.

1.6.1. Condición de falsa alarma

Dado lo previamente expuesto, es necesario poder caracterizar, de manera cuantitativa, algunas condiciones para establecer qué estrellas dentro del conjunto de las observadas pueden constituir falsas alarmas.

Para ello, se asume que los instrumentos de medida del satélite nos proporcionan los datos como la variación relativa del flujo: $\frac{\Delta F_s}{F_s}$. Donde el índice s hace referencia a la medición del satélite, y el flujo F_s está dado por el instrumento:

$$F_s = k_t F_t + \sum k_i F_i \quad (2)$$

Donde F_t es el flujo del target, F_i el de las estrellas contaminantes. Y, por último, k_t y k_i son factores que contienen la información de las fracciones de luz de cada estrella que caen dentro de

la apertura dada (Deeg et al., 2009). Por tanto, una detección positiva es aquella cuya variación corresponde intrínsecamente a la variación ΔF_t del target:

$$\frac{\Delta F_s}{F_s} = \frac{k_t \Delta F_t}{k_t F_t + \sum k_i F_i} \approx \frac{\Delta F_t}{F_t} \quad (3)$$

Y el caso negativo será cuando la mayor parte de esta variación venga dada por alguna de las estrellas contaminantes:

$$\frac{\Delta F_s}{F_s} = \frac{k_c \Delta F_c}{k_t F_t + \sum k_i F_i} \quad (4)$$

Donde el índice c hace referencia a la CEB presente dentro de las contaminantes, i .

Con estas condiciones es posible separar las falsas alarmas de las detecciones reales, pero es necesario el seguimiento terrestre para la toma de datos necesaria para conseguirlo.

La condición de falsa alarma, por tanto, es posible derivarla de la ecuación (3) como:

$$\frac{\Delta F_c}{F_c} \approx \left(\frac{F_t}{F_c} \right) k_c^{-1} \frac{\Delta F_s}{F_s} \quad (5)$$

Donde se ha tomado que $k_t \approx 1$ ya que el target suele hallarse enteramente en la apertura, y se ha ignorado el flujo de otras estrellas contaminantes en la misma apertura. Si k_c es desconocido, puede ser fijado como 1 y cambiar la condición de “ \approx ” a “ \gtrsim ” (Deeg et al., 2009).

Esto evidencia lo necesario que es para PLATO la existencia de un robusto seguimiento terrestre con el fin de descartar estas falsas alarmas y proporcionar detecciones fiables a fin de alcanzar los objetivos de la misión.

1.7. Programa de seguimiento terrestre

El programa de seguimiento terrestre de PLATO forma parte del Programa de Observaciones Terrestres, GOP (por sus siglas en inglés, *Ground-based Observations Programme*) de PLATO. Durante la actual fase de desarrollo y prelanzamiento del satélite sus principales objetivos son:

- Estimar la demanda prevista de recursos de observación.
- Reunir y organizar a los observadores necesarios.
- Organizar y ejecutar observaciones de referencia para evaluar las prestaciones de cada instalación.
- Diseñar estrategias eficaces y eficientes para la fotometría de seguimiento, incluyendo estándares para el análisis de los datos y la comunicación de los resultados. El presente trabajo es parte de este objetivo.

En la fase operativa, tras el lanzamiento, estas tareas cambiarán a:

- Coordinar la recogida, análisis e interpretación de los datos fotométricos, y los correspondientes informes de observación.
- Actualizar el estado de los candidatos observados en la base de datos PLATO Follow-Up tras un control de calidad de los datos.

Este programa de seguimiento consta de varios paquetes de trabajo, *WP* (*Work Packages* en inglés), de nivel inferior bajo un paquete de coordinación, incluyendo uno específico para identificar (y desarrollar si es necesario) herramientas fotométricas específicas adecuadas para la misión, y otro dedicado a la contribución ciudadana, donde el equipo de PLATO valora la contribución de los científicos ciudadanos y los astrónomos aficionados (Deeg and Alonso, 2024).

Por ello, en este trabajo, enmarcado en el primero de los dos *WP* mencionados, se evalúan cuatro paquetes de software de uso común dentro de astrónomos profesionales y/o aficionados

a la astronomía. Todos ellos de libre disposición y, salvo SIPS, cuentan con sus códigos fuente disponibles, lo cual, en principio, permite su modificación. Dando especial importancia al proceso de fotometría (y no tanto al procesamiento de las imágenes), por ser el punto más crítico para el éxito del seguimiento terrestre.

2. Proceso de evaluación

This section describes the working methodology as well as the evaluation process used to assess the different software packages.

In terms of methodology, the instructions of the developers for installation will be followed, and following the guides or tutorials available, use is made of test data, to assess the suitability of each one for the mission.

Four parameters are defined for the evaluation:

- Installation process, P .
- Access to and quality of documentation, A .
- User interface, I .
- Results obtained, R .

Each category is scored from 1 to 5, in half values. The final result is weighted as follows:

$$C = \frac{1}{5} (P + A + I + 2 \cdot R)$$

En esta sección se describe la metodología de trabajo empleada para la evaluación de los diferentes paquetes de software. El objetivo principal es asegurar una comparación rigurosa y objetiva de las distintas funcionalidades, la eficiencia y la usabilidad de cada paquete. Para ello, se trata de establecer un entorno controlado en el que se procede a la instalación sistemática de cada software, siguiendo las instrucciones del desarrollador para evitar sesgos operativos. Una vez instalados, se probarán con datos cuyos resultados ya son conocidos y representativos de un caso real, para evaluar la adecuación a la misión. Estos datos corresponden al caso de LRC04_E2_5526, que a partir de este momento se citará como 5526 por facilitar la lectura, un candidato de un posible tránsito, pero que resulta ser un CEB cercana al target, caso extraído del estudio del Dr. Hans-Jörg Deeg de imágenes obtenidas el 15 de junio de 2010 por el telescopio INT (*Isaac Newton Telescope*) en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), situado en La Palma, para el seguimiento de candidatos de la misión CoRoT. El resultado de este análisis, realizado con un software basado en IRAF, Vaphot, y un programa escrito en IDL para la visualización de la fotometría relativa, VANALIZ (Deeg, 2013), está incluido en el Anexo A.

Para la evaluación de los diferentes paquetes de software se definen cuatro categorías diferenciadas, y cada una de ellas será evaluada con un sistema de puntuaciones del 1 al 5, contando con valores semienteros, tal y como aparece en la Figura 6. Para, posteriormente, poder realizar una adecuada comparativa entre los diferentes paquetes a estudio de una forma lo más objetiva y libre de sesgos posible.



Figura 6: Ejemplo 4.5 estrellas, para la evaluación de los parámetros.

Para la elección de los parámetros se ha tenido en cuenta la importancia del contexto en el que serán empleados, destinados a usuarios con poca experiencia en la fotometría estelar. Es importante, entonces, tener en cuenta la facilidad de obtención, aprendizaje y adaptación al programa, así como de la calidad, resultados y posibilidades que ofrece el mismo. Para ello se han definido las cuatro categorías que se detallan a continuación.

2.1. Proceso de instalación

Facilidad, o dificultad, al tratar de descargar e instalar, si fuera necesario, el paquete de software a emplear. Se tomará en cuenta como positivo si existe un seguimiento de este proceso paso a paso, unas instrucciones de instalación, así como si es compatible con los tres sistemas operativos más comunes (Windows, Mac OS y Linux). El último punto es muy relevante teniendo en cuenta la naturaleza del estudio, debido a que se requerirá que un número elevado de personas con recursos informáticos variados empleen el programa.

Este estudio ha sido realizado empleando Windows 10; algunos detalles podrían variar para otros sistemas u otras versiones del mismo, en caso de ser compatibles.

2.2. Acceso y calidad de la documentación

Existencia y calidad de documentación que guíe al usuario y con la que sea posible aprender a usar las diferentes herramientas que proporciona cada uno de los softwares. En esta categoría se tomarán en cuenta tanto guías oficiales proporcionadas por los desarrolladores como bibliografía complementaria aportada por los mismos y por otros usuarios, tales como papers, tutoriales, foros, ejemplos, etc.

2.3. Interfaz de usuario

Optimización de las diferentes interfaces a las que se enfrenta el usuario en el uso de los paquetes de software incluidos en este estudio. Tomando en cuenta la claridad, la accesibilidad y la sencillez de las mismas. Así como la valoración de la curva de aprendizaje y adaptación a cada uno ellos, considerando que entre los usuarios se encontrarán tanto profesionales como aficionados a la astronomía.

2.4. Resultados

Calidad de los resultados obtenidos. Adaptación y adecuación de los mismos al objetivo de la misión. Se tomará en cuenta en esta parte la facilidad de obtención de los mismos, la claridad y las diferentes posibilidades que otorga cada uno de los softwares para el estudio de los resultados, así como de la exportación de los datos en forma tabular, además de la inclusión de información complementaria (como la masa de aire, tamaño de las aperturas, posición de las estrellas, etc.). Se utilizará como comparativa un estudio realizado previamente sobre los mismos datos de prueba (Anexo A).

2.5. Ponderación de las categorías

A fin de obtener una calificación cuantitativa de las mismas, más allá de la comparación directa entre categorías, se dará un valor numérico calculado como la media ponderada de todos los valores anteriores, dando un peso significativamente mayor (el doble que al resto de categorías) a la última. Esto es debido a que se considera que, independientemente del proceso, los resultados son el punto más relevante del desempeño de cada uno de los softwares.

Por tanto, se define la siguiente fórmula:

$$C = \frac{1}{5} (P + A + I + 2 \cdot R) \quad (6)$$

Donde C es la calificación total, P la calificación del proceso de instalación, A la del acceso a la documentación, I la correspondiente a la interfaz de usuario y R la de los resultados obtenidos. Las calificaciones se emplearán al final para un análisis comparativo.

3. AstroImageJ

In this third section we proceed to the analysis of the software package AstroImageJ, developed by the University of Louisville. Versions are available for the three major operating systems.

For AIJ, the process explained above is followed, but in addition, a second set of images is used for training purposes, as these are provided by the developers.

AIJ proves to be a very complete program for all mission requirements, as it allows the complete visualization of results in a single interactive graph, in which all calculations are presented. The only negative point found is the difficulty in adapting to the program due to the complexity of its interface when performing photometry.

El primero de los paquetes de software a analizar es AstroImageJ (Collins et al., 2017). Este es una extensión de ImageJ, una interfaz gráfica de usuario (GUI), desarrollada por la agencia estadounidense Institutos Nacionales de Salud (NIH). Basado en Java, es un programa para el procesamiento general de imágenes.

AstroImageJ (AIJ, a partir de ahora), desarrollado por la Universidad de Louisville, proporciona un entorno de visualización de imágenes y herramientas específicas para la astronomía, así como también para la calibración de imágenes y la reducción de datos astronómicos.

AIJ se ha optimizado para la fotometría diferencial de series temporales, derivación y ajuste de curvas de luz, y el trazado de las mismas, especialmente para aplicaciones que requieren curvas de luz muy precisas. Por ejemplo, los tránsitos de exoplanetas, que es por lo que interesa en este estudio.

Durante este estudio se ha empleado, mayoritariamente, la última versión disponible al comienzo de este, la versión *5.3.2.00*, disponible desde 8 de enero del 2024. El software se encuentra actualmente con mantenimiento recurrente, contando con actualizaciones cada pocos meses.

3.1. Proceso de instalación

En este apartado, AIJ, resulta muy sencillo de instalar, pues con tan solo buscar el nombre del programa el primer resultado es la página web de la Universidad de Louisville destinada al mismo (UofL, 2021), donde resulta intuitivo encontrar y seguir el proceso de instalación del mismo.

Otro aspecto a considerar es que existen versiones para los tres sistemas operativos principales, así como una carpeta donde se pueden descargar versiones más antiguas del programa, en caso de interés. El proceso de instalación está claramente guiado, tanto en la web como en la guía de usuario (*AstroImageJ_User_Guide.pdf*).

Por consiguiente, en este apartado la puntuación es:



3.2. Acceso y calidad de la documentación

En la web ya citada, de la Universidad de Louisville, hay a disposición de los usuarios, a parte de la guía de usuario, datos de prueba (de un tránsito del planeta WASP-12b) junto con tutoriales útiles para aprender y familiarizarse con el uso del programa. También ponen a disposición un foro para la consulta de dudas y resolución de posibles problemas o errores.

Mencionar también la existencia de varios foros externos, tutoriales hechos por otros usuarios, etc. debido al uso generalizado de este paquete de software.

La calificación de esta sección es:



3.3. Interfaz de usuario

En esta sección a cerca de la interfaz de usuario de AIJ, al inicio, resulta intuitivo pues las diferentes opciones están muy claras y accesibles, y la visualización de los archivos *.fits* es muy clara. Pero, especialmente al realizar la fotometría multiapertura, siendo lo más relevante de este estudio, se abren de golpe una gran cantidad de pestañas, con las diferentes opciones de la misma, como se puede observar en la Figura 9 en la parte inferior de la misma. Esto puede resultar algo intimidante, y es complicado acceder a toda la información. En gran parte es debido a la cantidad de opciones diferentes y a la flexibilidad que proporciona esta herramienta.

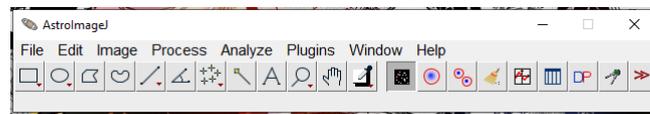


Figura 7: Interfaz inicial de AIJ

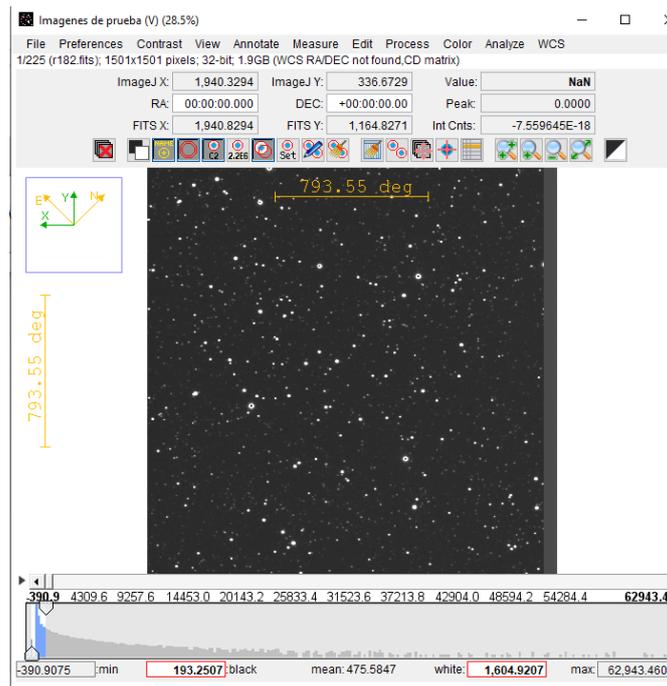


Figura 8: Visualización de archivos *.fits* en AIJ

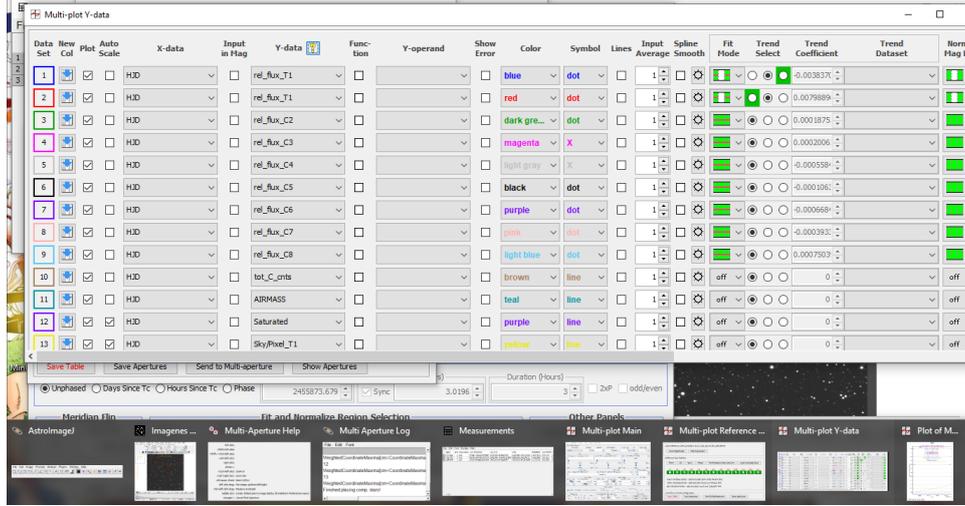


Figura 9: Fotometría multiapertura en AIJ

Es por este detalle, que, pese a que se puede trabajar con normalidad una vez adaptado, dificulta el aprendizaje del programa y la adaptación de nuevos usuarios. Por lo que la calificación de esta sección resulta en:



3.4. Resultados

En esta sección se van a analizar los resultados para dos conjuntos de datos, el ya descrito caso de 5526 y los proporcionados como ejemplo en la página web de AIJ, WASP-12b, un caso paradigmático de un exoplaneta que órbita la estrella WASP-12 (Hebb et al., 2009). Se emplean en este caso ambos conjuntos de datos pues los de WASP-12 son proporcionados por los desarrolladores de AIJ junto a un tutorial para ayudar al usuario a familiarizarse con la herramienta.

Es relevante hacer mención de como AIJ obtiene los valores con los que posteriormente hace los cálculos y muestra los resultados. Para ello, primero se describen de forma breve los fundamentos que seguirán todos los softwares analizados más adelante en este estudio, de forma común, para destacar en cada uno de ellos las particularidades que los diferencian.

Los softwares especializados en fotometría suelen calcular los resultados a partir de intensidades luminosas. Para ello se define:

$$S = I + B \cdot A \quad (7)$$

Donde S es la suma de píxeles en un área pequeña A alrededor de un objeto (que puede ser o no el target), que corresponde a la intensidad de la estrella I más la correspondiente al fondo $B \cdot A$, donde B es el flujo promedio de los píxeles debido al brillo del fondo. Con ello es inmediato obtener I despejando de la expresión anterior, en unidades ADU (*Analog-to-Digital Units*). Estos parámetros se pueden identificar en la Figura 10, de forma que el área bajo la curva encerrada como *source* corresponde a S , la altura (valor en el eje vertical en ADU) de la curva en el recuadro *background* corresponde a B , A corresponde al área de un círculo de 17.00 píxeles, en este caso, marcado como *Radius* e I al área resultante de la resta definida anteriormente: $I = S - B \cdot A$.

A partir de esta definición general, AIJ calcula el flujo relativo del target en comparación con el de las estrellas de referencia (Collins et al., 2017). Es decir, el flujo diferencial del target se obtiene dividiendo las cuentas integradas del target, F_T , entre la suma de las cuentas integradas de las estrellas de referencia, con índice C , referente a *Comparison Star*:

$$rel_flux_T_j = \frac{F_T}{\sum_{i=1}^n F_{C_i}} \quad (8)$$

Donde el subíndice j hace referencia a la apertura del target e i a la relativa a las estrellas de comparación.

Para las estrellas de comparación, las cuales también pueden mostrarse en la gráfica de resultados (ver Figuras 11, 12 y 14), el flujo relativo que calcula AIJ viene dado por el flujo de la estrella de comparación dividido por la suma de los flujos de las otras estrellas de comparación, esto es:

$$rel_flux_C_j = \frac{F_{C_j}}{\sum_{i=1}^n F_{C_i}} ; i \neq j \quad (9)$$

Definido esto, podemos empezar con el análisis. En el primer conjunto de datos, del WASP-12b, propuesto por los desarrolladores de AIJ, se siguen los pasos del tutorial y se dejará que el programa haga los cálculos tomando en cuenta únicamente las estrellas de comparación que considere, automáticamente (pues como veremos posteriormente se pueden introducir de forma manual).

El primer paso es conocer las aperturas óptimas para realizar los cálculos. La apertura es el área centrada en el objeto en el cual se realizan los cálculos sobre las cuentas de las diferentes imágenes. Por ello es fundamental la correcta selección del tamaño de esta. Una elección demasiado pequeña podría dejar fuera información relevante del objeto medido, y una demasiado grande podría introducir información de objetos cercanos, contaminando la medida. AIJ permite obtenerlas de forma sencilla, para ello, calculamos el perfil del target, y hacemos uso de la secuencia de comandos: *Analyze* → *Plot Seeing Profile...* con lo que AIJ nos proporciona una gráfica con la información necesaria (Figura 10):

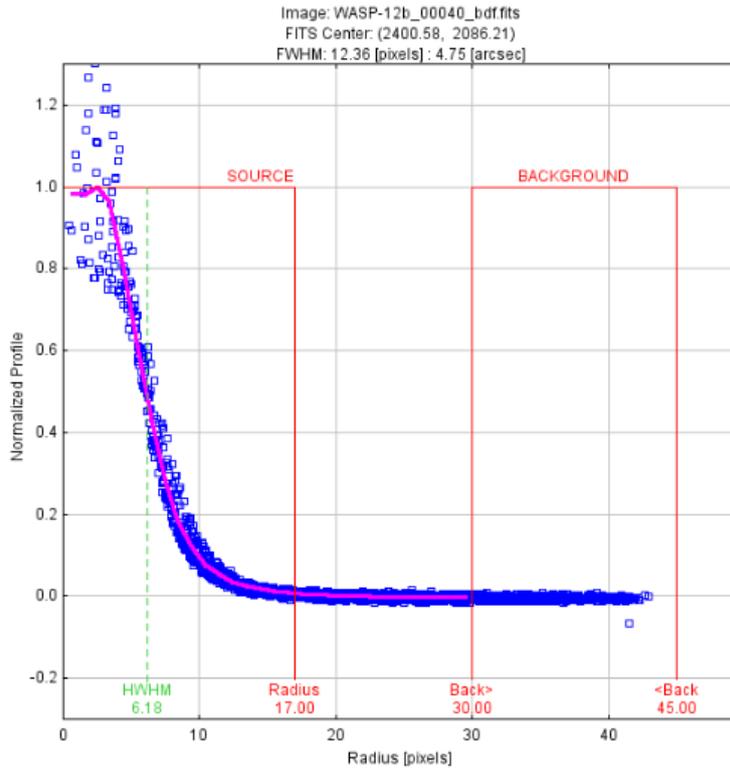


Figura 10: Perfil de la estrella WASP-12

La gráfica muestra la anchura media a media altura (*HWHM* por sus siglas en inglés), la *FWHM* y los radios de apertura sugeridos en píxeles. El criterio numérico empleado para determinar estos parámetros automáticamente es para el radio de apertura se fija en $1.7 \cdot FWHM$, marcado como *source* y para los radios interior y exterior del anillo de *sky-background* (cielo de fondo, en inglés) se fijan en $1.9 \cdot FWHM$ y $2.55 \cdot FWHM$, respectivamente. Sin embargo, el usuario puede decidir no emplear las seleccionadas con este criterio por el programa. Pudiéndose seleccionar estos parámetros manualmente. Una vez realizado este proceso, se puede guardar esta información automáticamente

para los pasos posteriores desde la misma gráfica.

Con esta información, podemos realizar la fotometría multiapertura con la opción *Multi Aperture Tool*, pudiendo seleccionar así el target de nuestro estudio. Esta opción, entre las ventanas mostradas en la Figura 9, devuelve una gráfica interactiva donde condensa toda la información que calcula, así como una tabla con todos los datos, para su posterior análisis si se precisase. Es relevante reincidir en el hecho de que, para este primer ejemplo se toman como estrellas de comparación las que el AIJ selecciona automáticamente.

La gráfica obtenida para el caso de WASP-12 (Figura 11):

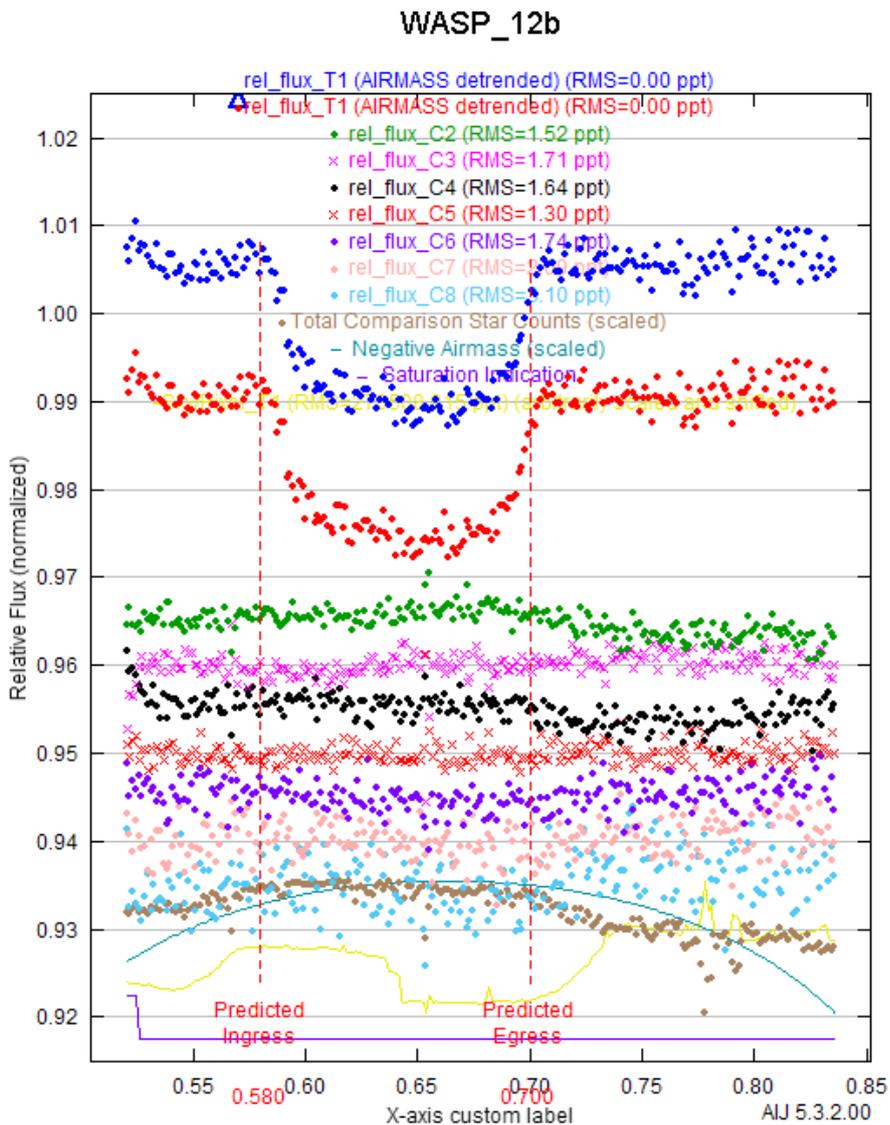


Figura 11: Tránsito de WASP-12b. Aparecen los flujos relativos señalados como *rel_flux*, tanto de las estrellas de referencia como del target. También las cuentas totales de las estrellas de comparación (marrón), la masa de aire negativa (azul claro), la saturación (azul oscuro) y una comparación Sky/Pixel_T1 (amarillo) con el target. Siendo el eje horizontal la parte decimal de la fecha juliana

En esta se puede apreciar de forma bastante clara el flujo relativo, llamado *rel_flux*, tanto de las estrellas de referencia, las cuales permite representar hasta un máximo de 7 a elección del usuario, pese a poder emplear más en el cálculo, y el flujo relativo al target, con un *detrending* (eliminación de tendencia, en castellano) de la masa de aire. Además, proporciona en la gráfica otros datos que pueden resultar de interés, como pueden ser la masa de aire, la saturación, o una comparación entre las cuentas de las estrellas, entre otros parámetros de interés. También calcula

una estimación del ingreso y salida del planeta durante el tránsito, señalados con líneas verticales rojas.

En la Figura 11 se observa claramente que se trata del tránsito de un exoplaneta, ya que la única estrella que presenta variación en la gráfica es el target, y su curva de luz está dentro de los parámetros esperables de un tránsito, expuestos anteriormente.

Habiendo empleado el ejemplo anterior a modo de entrenamiento, el segundo caso a tratar es más relevante para el objetivo de este estudio, el ya mencionado caso de 5526, que nos permite conocerla fiabilidad del software empleado para la detección de falsas alarmas. Repitiendo el mismo proceso paso a paso que para el caso anterior, con la diferencia de que se toman manualmente las estrellas de comparación, pues se cuenta para este caso con un documento cedido por el Dr. Hans J. Deeg con las coordenadas de estrellas similares al target, optimizando así los resultados. Para ello se han empleado 15 estrellas de comparación. Obteniendo, para este segundo caso (Figura 12):

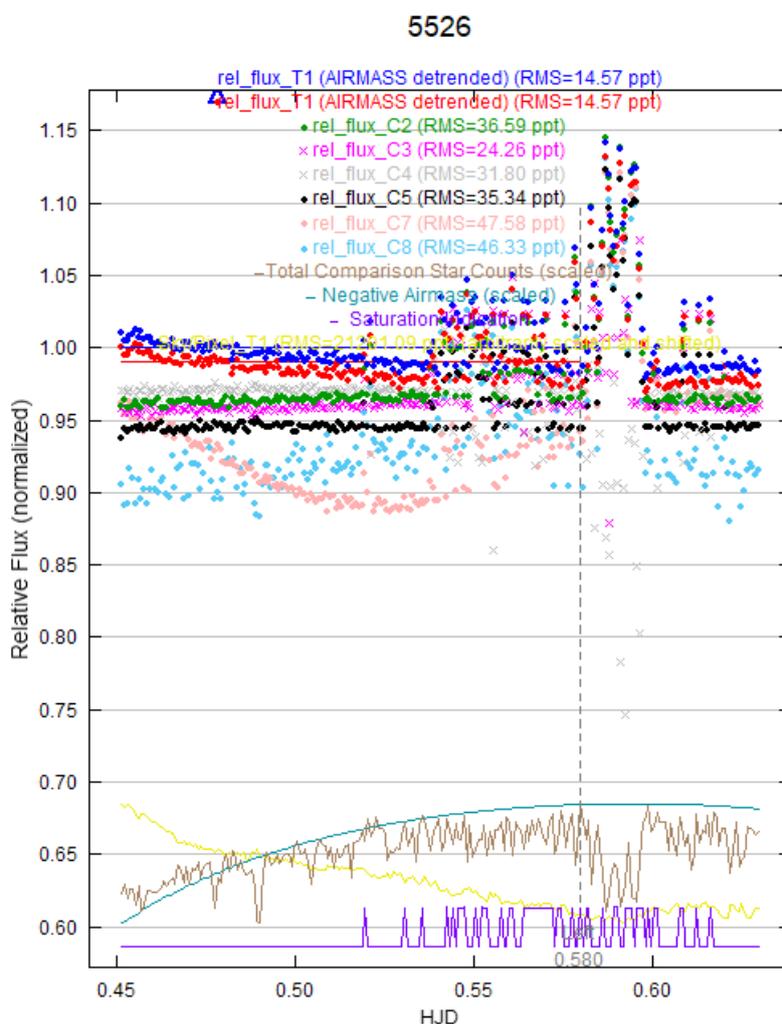


Figura 12: Análisis preliminar de 5526. Aparecen los mismos valores que en la Figura 11. La línea punteada en este caso es un error en el cálculo del ingreso y salida del tránsito, pues no existe en el target

Se observa una gran distorsión en la parte derecha de la gráfica, siendo posibles varias causas. Además, el target y la mayoría de estrellas de comparación tienen curvas de luz sesgadas. Y cómo las diferentes curvas de luz aparecen muy próximas unas a otras, siendo complicado identificarlas visualmente. Sin embargo, AIJ, entre las ventanas de opciones que se ven en la Figura 9, nos permite eliminar de los cálculos aquellas estrellas de comparación que introducen mucho ruido en la gráfica final. Más concretamente se puede ver en la siguiente figura:

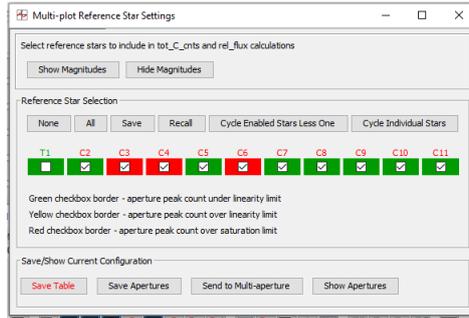


Figura 13: Ventana de selección de estrellas de comparación adecuadas

En la Figura 13 se señalan en rojo las estrellas que generan una gran distorsión. Siendo muy sencillo eliminarlas, mejorando notablemente el resultado final. Esto se hace visible en el valor que aparece en la leyenda como: *RMS*, siglas en inglés de *Root-mean-square deviation*, que es la raíz del error cuadrático medio, en partes por mil, *ppt* (*parts per thousand*). Para optimizar los resultados este valor debe ser lo más bajo posible, siendo así en la Figura 14. También, por claridad, se han aplicado arbitrariamente desplazamientos fijos en el eje vertical de la gráfica, sin modificar la forma de las curvas de luz, para distanciarlas entre sí. Como resultado de estas modificaciones se obtiene la Figura 14:

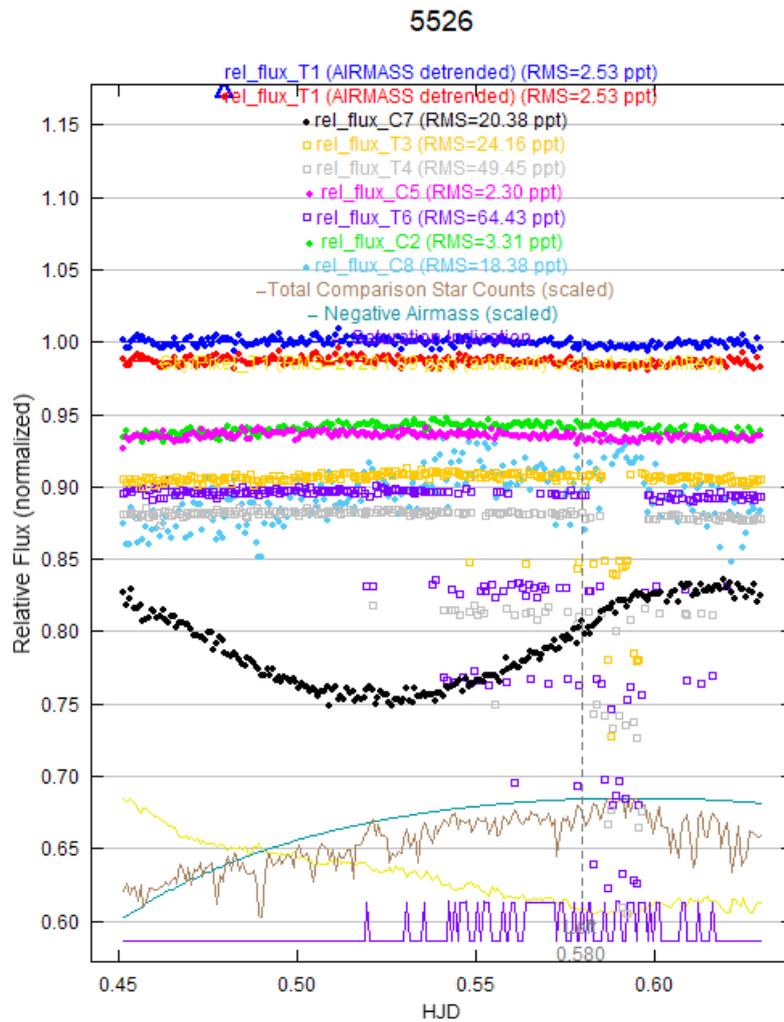


Figura 14: Análisis definitivo de 5526

En la Figura 14, las estrellas eliminadas de los cálculos se han indicado con cuadrados vacíos de distinto color (morado, gris y naranja), y se observa una gran caída en los valores de estos en la misma zona donde la Figura 12 presenta la distorsión, mientras las otras estrellas tienen una curva plana en esta zona.

Al compararla con el caso de WASP-12b, destaca notablemente que el target, indicado como: $T1$, no presenta variación alguna. Sin embargo, la estrella de comparación $C7$, llamado rel_flux_C7 y representada de color negro en la gráfica, presenta una gran variación en su curva de luz. Esta estrella, al comprobar las posiciones sobre el campo, es próxima al target. Por tanto, se puede concluir que en este caso no hay un tránsito en el target, si no una estrella contaminante en la apertura, con una variación en torno al 5 %, que hizo saltar una falsa alarma. Haría falta un estudio más detallado y concreto de esta estrella en particular para averiguar el motivo, en cualquier caso, podemos descartar que se trate de un tránsito en el target. Aunque la forma de la curva de luz indica el eclipse de un sistema binario.

Gracias a este segundo análisis, AIJ destaca para el propósito de la misión, siendo muy válido y claro a la hora de descartar falsas alarmas. Esto es debido a que únicamente con el estudio del perfil del target, contando con las estrellas de comparación, es posible confirmar o descartar una alarma. Es decir, no es necesario realizar el estudio de las estrellas individualmente. De forma muy visual proporciona todos los perfiles en una única gráfica interactiva, siendo posible realizar el estudio completo de la alarma proporcionada por el satélite.

Como se ha indicado previamente, el programa permite representar un número limitado de estrellas a la vez; sin embargo, emplea todas las seleccionadas para los cálculos, resultando muy sencillo y rápido variar entre cuales se quiere incluir en el cálculo y cuales se quiere representar. Además, AIJ proporciona junto a la gráfica un fichero de texto en el que se encuentran todos los parámetros calculados por el programa, los representados en las Figuras 11 y 14 junto a otros que pueden resultar de gran interés para análisis más exhaustivos empleando herramientas externas, como se puede ver en el Anexo A.

Es por ello que la puntuación de este apartado para AIJ, tomando en cuenta su validez para los objetivos de la misión, es:



4. Siril

The second software analysed is Siril, developed by the Team Free Astro group. Versions are available for the three main operating systems. Here the interface is less complex, but the adaptation is a little complex as well.

In terms of results, Siril has some drawbacks, as it presents the light curves as a function of magnitude in a graph that cannot be scaled, so that as more comparison stars are introduced, clarity and the ability to discriminate between different situations is reduced. Therefore, the main objective can be achieved, but not in the most optimal way.

El segundo de los paquetes de software considerados del cual vamos a realizar un análisis es Siril (Team-FreeAstro, 2024b). Siril es una herramienta de procesamiento de imágenes astronómicas, diseñada para reducir el ruido y mejorar la relación señal/ruido de una imagen, capaz de convertir, preprocesar, ayudar a alinear automática o manualmente, apilarlas y mejorar las imágenes finales y extraer la fotometría de estas. Se trata de un software libre desarrollado por *Team FreeAstro*.

Según los desarrolladores, el lenguaje de programación es principalmente C , con partes en $C++$. El desarrollo principal se realiza con las versiones más recientes de bibliotecas compartidas en $GNU/Linux$. Esta información puede ser de interés al tratarse de un software libre.

Durante el estudio se ha empleado la versión 1.2.1 del programa, disponible desde el 26 de enero de 2024. Por lo que el programa se encuentra actualmente con mantenimiento.

4.1. Proceso de instalación

En este apartado, al igual que con AIJ, Siril resulta muy sencillo de instalar, pues con la búsqueda del nombre aparece como primer resultado la web ya citada, donde es muy sencillo encontrar el apartado de descargas y elegir el sistema operativo en el que se trabaja, así como la versión a descargar. También existe la posibilidad de descargarlo mediante distribuidores externos, como *Microsoft Store*.

Existen versiones para los tres principales sistemas operativos, así como la posibilidad de acceder al código fuente del programa, en caso de interés, con el deseo de modificarlo.

El proceso es estándar y no presenta complicación, así pues en esta sección la puntuación es:



4.2. Acceso y calidad de la documentación

En la propia web de Siril, ya citada, encontramos accesible una gran cantidad de tutoriales, así como acceso a documentación (Team-FreeAstro, 2024a), y acceso a foros donde tanto los mismos desarrolladores como otros usuarios del programa pueden discutir sobre temas relacionados a este. Y esta documentación se encuentra traducida a diferentes idiomas, lo que la hace más accesible.

La calificación de esta sección es, por tanto:



4.3. Interfaz de usuario

En este caso, la interfaz de usuario resulta un poco más difícil de seguir, al inicio, que en el caso anterior. Debido a pequeños errores en la traducción de algunas secciones y a que el idioma se configura automáticamente al del equipo en el que es instalado, en este caso en castellano; problema que puede ser solventado configurándolo en el idioma de desarrollo, el inglés. Una vez hecho esto, resulta sencillo explorar las diferentes posibilidades que brinda Siril. También cuenta con una opción para trabajar desde la consola con comandos de texto en lugar de utilizar la interfaz gráfica, en caso de que algún usuario así lo prefiera.

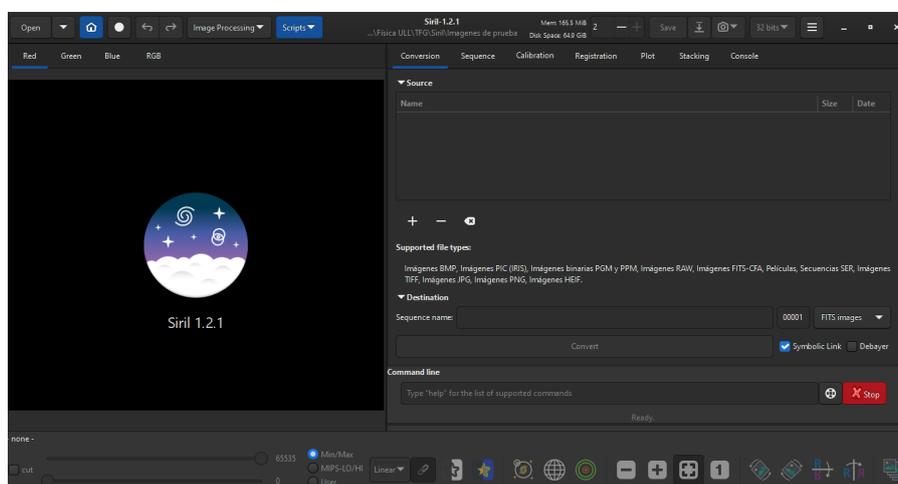


Figura 15: Interfaz de inicio de Siril

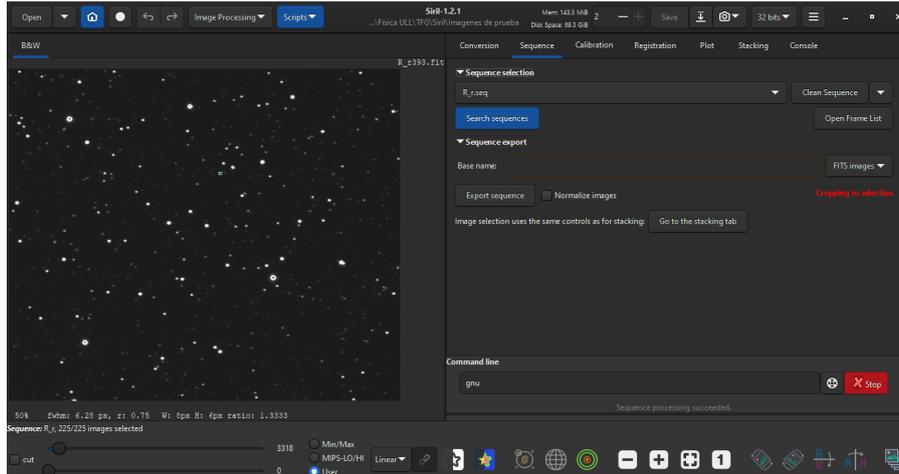


Figura 16: Visualización de imágenes en Siril

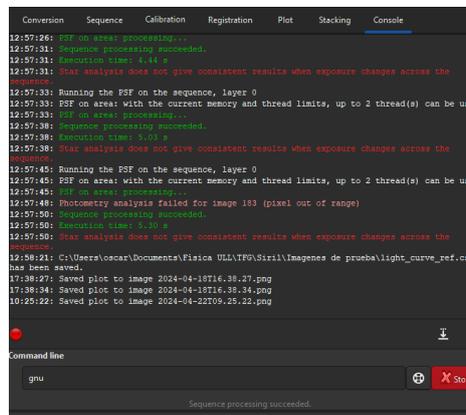


Figura 17: Consola de mando de Siril

Debido a lo anteriormente mencionado, y tomando en cuenta que el proceso de adaptación y aprendizaje es asequible para usuarios con conocimientos básicos en el campo, la calificación otorgada a esta sección es:



4.4. Resultados

Para el análisis de los resultados que se pueden obtener empleando Siril, se va a analizar únicamente el caso de 5526. Ya que así se puede realizar una comparativa adecuada entre las diferentes herramientas, viendo como responden a un caso de una alarma falsa.

A la hora de trabajar con Siril es importante tener en cuenta que emplea catálogos astronómicos ya conocidos para encontrar las estrellas de trabajo, como son: NOMAD (Zacharias et al., 2004) empleado por defecto, TYCHO2, Gaia DR3 o PPMXL. Esto puede ser de ayuda si se consigue que el programa reconozca la región del cielo con la que se trabaja. Sin embargo, también es posible ignorar esta opción y trabajar de forma manual. En concreto, para los resultados que se muestran en las Figuras 18, 19 y 20, se emplea una mezcla de ambas opciones, pues es la que resultó ser más eficiente, debido a la necesidad de analizar las estrellas cercanas al target.

Partiendo de la base general ya desarrollada, Siril emplea la intensidad, I , para calcular la magnitud aparente de un objeto, m , y presenta los resultados en función de este nuevo parámetro. Suponiendo que la intensidad es proporcional al flujo observado F , empleando la ley de Pogson:

$$m = -2.5 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (10)$$

Es importante señalar que Siril trabaja únicamente con archivos en formato *.fit* y no es compatible otras variaciones del mismo (como puede ser *.fits* o *.fts*) u otros formatos de uso común, como *.csv* o *.txt*. Por lo que puede dar problemas si no se convierten debidamente los nombres de los ficheros. Al trabajar con Siril también facilita mucho los primeros pasos si las imágenes están numeradas, para poder definir dentro del programa una secuencia, por ejemplo: *r_001*, *r_002*, *r_003*...

Teniendo en consideración lo expuesto anteriormente, se comienza con el proceso para la fotometría siguiendo las instrucciones de los tutoriales de la web. Empezando por identificar la estrella de referencia, habiendo cargado las imágenes en Siril como secuencia, empleando la herramienta llamada *Image Plate Solver*, mediante prueba y error, si no se conocen, como es el caso, los parámetros originales de *Focal length* (distancia focal) y *Pixel size* (tamaño del píxel). Una vez encontrados los valores que permiten a Siril reconocer las estrellas en comparación al catálogo NOMAD, podemos realizar la fotometría de nuestra secuencia de imágenes. Sin embargo, como factor negativo de este paso del estudio, no se consiguió que Siril reconociera las diez primeras imágenes de la secuencia, lo que afecta de forma notoria a las curvas de luz expuestas más adelante, pues se pierde información. A pesar de esto es posible continuar. Para realizar la fotometría, se calcula el perfil del target, donde se cuenta con varias opciones, como el *FMWH* o el *Roundness*, entre otros, calculado por el programa, pero en este caso se toma la magnitud frente al número de frames, es decir, la imagen de la secuencia:

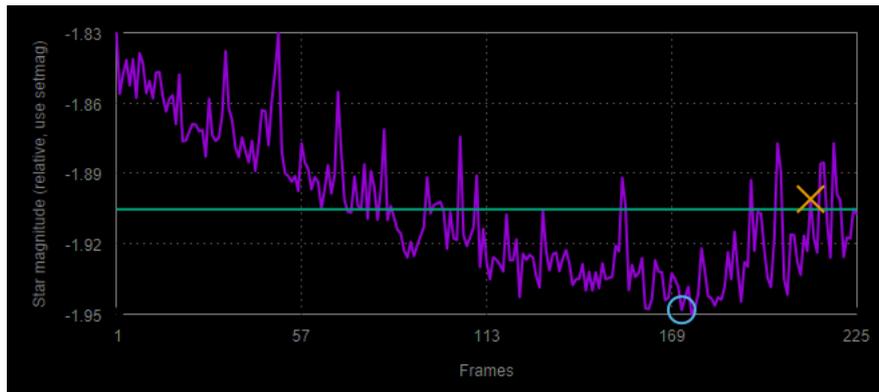


Figura 18: Gráfica de la magnitud aparente del target frente al número de imagen. Se aprecia un incremento del brillo en torno a 0.1 mag (el brillo incrementa hacia abajo)

En la Figura 18 se puede ver la forma de la curva de luz, y como la magnitud instrumental presenta una curvatura hacia abajo. Esto será relevante posteriormente en este estudio. Debido a que al estar en función de la magnitud el brillo incrementa hacia abajo, lo que se ha de tener en cuenta en las siguientes representaciones. Como aspecto negativo que resulta relevante en todas las gráficas proporcionadas por Siril, el eje horizontal es siempre el número de *frame* (o de imagen), no pudiendo ponerse en función de la hora juliana o del tiempo universal coordinado; dificultando así extraer algunas conclusiones. En principio, por lo que se puede leer en la guía de usuario y en los ejemplos proporcionados en la web sí es capaz de extraer esta información de la cabecera de las imágenes, pero no se pudo realizar con las de prueba de este estudio.

Repetiendo el mismo procedimiento con las estrellas de comparación, y con la posibilidad del programa de representarlas en la misma gráfica, se emplean las ocho estrellas de referencia más cercanas a nuestro target, 5526, para la gráfica. Se emplean 8 y no más pues al ser la gráfica de un tamaño fijo, no pudiendo ampliarse, al tomar una gran cantidad de estrellas la gráfica tiende a separarse mucho, perdiéndose así la capacidad de comparación visual. La gráfica obtenida es:

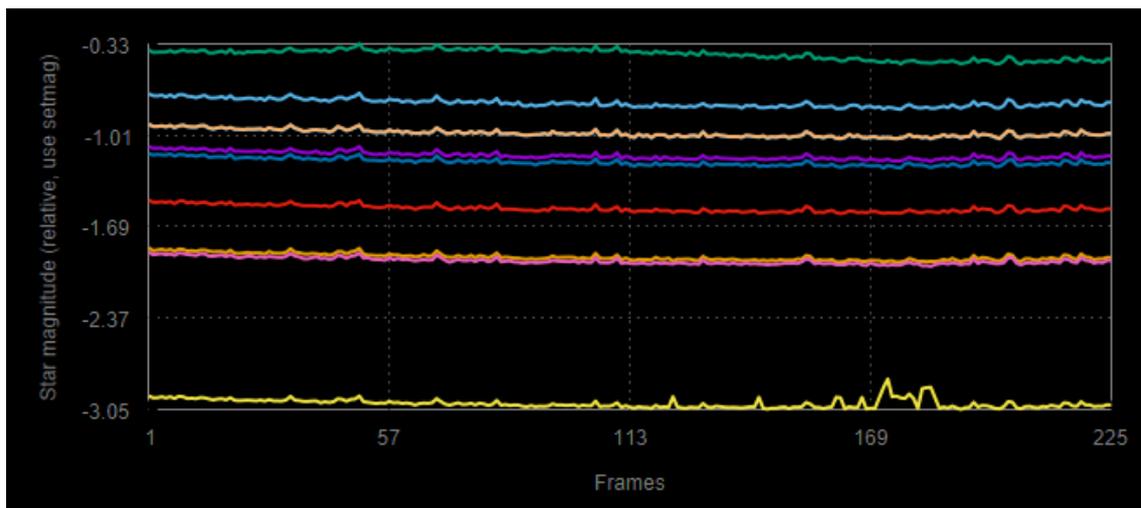


Figura 19: Gráfica con el target, en morado, y 8 estrellas de comparación

En la Figura 19 podemos ver como casi todas las estrellas presentan la misma forma en su curva, salvo dos, que presentan variaciones. La representada en amarillo, la de menor magnitud, tiene una ligera distorsión, pero tras analizarla se descartó que fuera relevante. La más significativa, la representada en color verde en la parte superior de la gráfica, posee una curvatura diferente a las demás estrellas representadas. Se procede a un estudio con mayor detalle de esta, representando únicamente su curva en la Figura 20:



Figura 20: Gráfica de la magnitud aparente de la CEB frente al número de imagen

Es posible observar, al comprar las Figuras 18 y 20, que la curvatura de la última es diferente a la seguida por el target (así como al resto de estrellas). Tratándose de una reducción en el brillo, coincidiendo con los resultados ya conocidos, pudiendo deberse a un tránsito, o en este caso a un eclipse debido a la naturaleza de la misma. Comparando con el estudio previo, se trata de la misma estrella, es decir, de la CEB que ya se había encontrado con AIJ y que aparecía como *C7*, o con el estudio previo del que se obtuvieron los datos originalmente. Pero también se ve que la forma de esta curva, en la parte izquierda del gráfico, pierde información relevante, la cual sí aparece en la Figura 12, como es el inicio del eclipse, siendo menos claro en el caso de Siril. Por tanto, que es posible detectar las falsas alarmas empleando Siril, sin embargo, depende de una diferencia sutil en las gráficas que podría pasar desapercibida, especialmente al tratar con muchas estrellas de comparación.

Los propios desarrolladores recomiendan emplear *gnuplot*, un programa especializado en generar gráficas, para realizar un análisis más extenso, pues es compatible con el programa, y se puede vincular a este de forma que genere automáticamente las curvas de luz de las estrellas a estudiar. Esto podría ser de utilidad, pero es difícil realizar la vinculación, ya que no hay información al respecto.

También es posible hacerlo con otras herramientas externas, como se ve al final del documento en el Anexo A, ya que Siril proporciona en forma de tabla los datos calculados, de forma que se pueden emplear herramientas externas para el estudio de la fotometría obtenida con Siril.

Tomando en cuenta la calidad de los resultados con lo anteriormente expuesto en esta sección, y su adecuación a los objetivos de la misión, la calificación es:



5. C-Munipack

The next software package is the so-called C-Munipack, developed by David Motl. It has versions compatible with Windows and Linux, but not Mac OS. This software has a simpler interface, with the advantage that the program itself guides you by blocking options if the prerequisites for applying them are not met.

C-Munipack gives many options when making the light curves, allowing a very complete and rigorous study in a simple way. However, these graphs are displayed one at a time, with no option for a general overview. With this, it proves to be a valid and adequate program for the PLATO mission.

El siguiente software considerado en este estudio es C-Munipack (Motl, 2011). Se trata de un paquete de software para la astrofotometría diseñado para la reducción de imágenes tomadas con cámaras CCD o DSLR, destinadas a la observación de estrellas variables, exoplanetas y cuerpos menores del Sistema Solar. En concreto se trata de una ampliación del software Munipack, pero implementado en lenguaje *C/C++*, con el objetivo de hacerlo más portable a otros sistemas operativos y plataformas. El software aparece en la bibliografía con dos nombres diferentes, el ya empleado *C-Munipack*, o *Muniwin*. Se trata de un software libre, por lo que puede ser modificado en caso de interés.

El software se encuentra actualmente con mantenimiento, habiendo recibido actualizaciones mayores en 2023 y 2024. Concretamente para este estudio ha sido empleada la última de ellas disponible, la versión: *Muniwin 2.1.37*, disponible desde el 10 de enero de 2024.

5.1. Proceso de instalación

C-Munipack resulta, también, sencillo de instalar pues el proceso de instalación es el estándar seguido para los casos anteriores.

Sin embargo, C-Munipack no tiene una versión disponible para Mac OS, lo que puede generar un problema para aquellos usuarios que no dispongan de otra alternativa. Sí tiene versiones compatibles con Window y Linux, aunque la versión de Linux requiere la compilación por parte del usuario.

En este apartado la calificación es:



5.2. Acceso y calidad de la documentación

En este apartado se toma en cuenta la existencia de un manual oficial proporcionado por el desarrollador del software, en formato web, con gran cantidad de detalle sobre la última versión disponible del mismo (Motl, 2024). Además de la existencia de otras fuentes de información con ejemplos del programa disponibles en internet, como foros y ejemplos de otros usuarios.

Es por ello que la calificación de esta sección es:



5.3. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario de C-Munipack es la más sencilla de las empleadas hasta el momento. Pues solo cuenta con una pantalla principal, con todas las opciones disponibles para el usuario. Al igual que Siril, existe la opción de trabajar en la interfaz gráfica o mediante comandos en consola, si se prefiere.

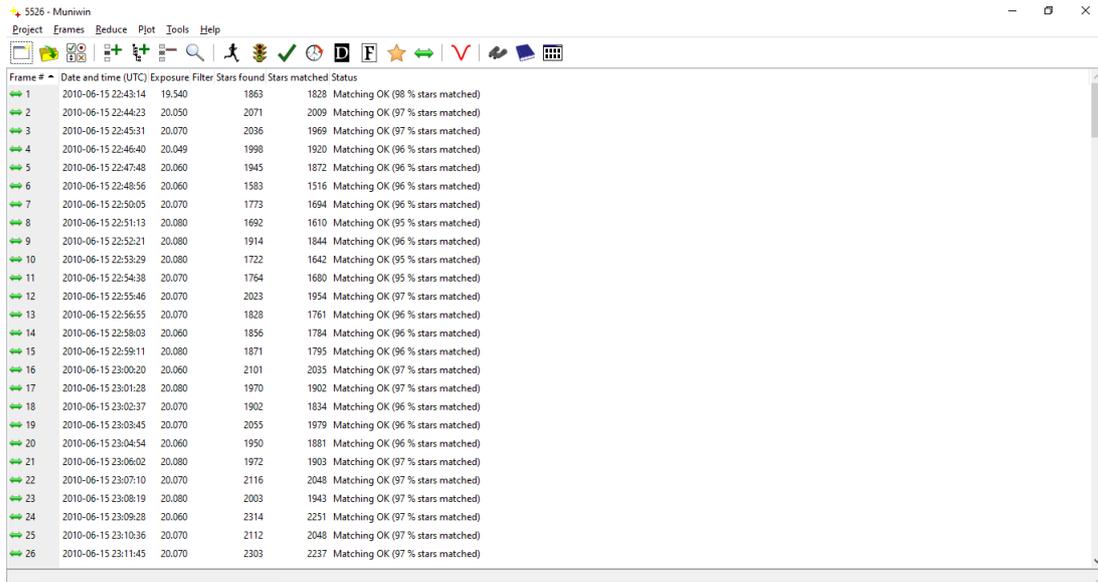


Figura 21: Interfaz de C-Munipack con las imágenes cargadas

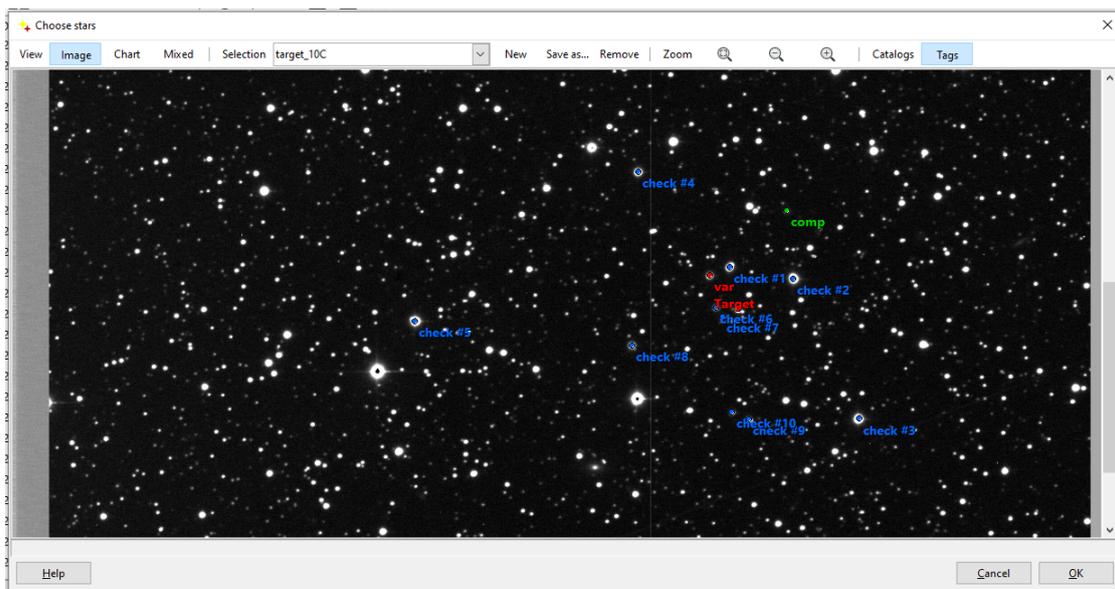


Figura 22: Imagen cargada, con un conjunto de estrellas seleccionado para la fotometría. El target aparece en rojo, la estrella de comparación en verde y las de control (*check*) en azul

Se trata de una interfaz muy intuitiva, que guía al usuario en los diferentes pasos por orden para realizar la fotometría, ya que mantiene “bloqueadas” algunas opciones si no se han realizado

los pasos previos necesarios. Por tanto, es muy sencilla y rápida la adaptación a este software si se cuenta con nociones de programas similares, o bien si se está familiarizado con los conceptos básicos de la fotometría. Por ello su calificación es:



5.4. Resultados

C-Munipack ofrece diversas posibilidades respecto a las distintas etapas del tratamiento de datos astronómicos. En este trabajo nos centramos únicamente en lo que, en términos de este programa, se llama fotometría de aperturas, y ligeramente en la parte de detección de estrellas, pues es un paso necesario.

La fotometría de apertura determina el brillo de un objeto integrando la señal de una pequeña área de un fotograma. Esta área, corresponde a la ya mencionada apertura, y se elige de forma que incluya todos los píxeles que fueron expuestos por la luz del objeto medido, pero no por la luz de otra fuente. C-Munipack da la opción de realizar todos los cálculos para diferentes aperturas, que pueden ser cambiadas manualmente, estimando cuál es la más óptima para el objeto elegido.

En lo que respecta a los cálculos y cómo aparecen expresados los resultados, emplea, al igual que Siril, las magnitudes diferenciales de los objetos. Por lo que los cálculos son, en todos los aspectos, equivalentes a los ya detallados en la sección anterior para Siril. Con la única diferencia de que C-Munipack ofrece la opción de representar magnitudes de diferentes fuentes comparadas entre sí, para poder apreciar el cambio relativo de esta magnitud (o en el brillo) de diversas estrellas, a elección del usuario.

Para realizar la fotometría de apertura es necesario definir tres tipos de objetos diferentes:

- Estrella variable, V .
- Estrella de comparación, C .
- Estrellas de control, K_n .

Como se cuenta previamente con un catálogo de estrellas de similares al target en el campo dado, estas pueden ser incluidas como estrellas de comparación o de control. Se emplean 10 estrellas de control y una de comparación, seleccionando una similar en brillo al target pero que se encuentre alejada de este.

Dado lo anteriormente expuesto, se procede con la fotometría, siguiendo los pasos de C-Munipack. Empezando con acciones automáticas como son el procesado de las imágenes o *frames*, y la conversión de los archivos dados al formato de trabajo. El siguiente paso, llamado *Run Photometry*, es crucial en el estudio, pues es en este donde se puede seleccionar las diferentes aperturas que se emplearán en los cálculos, así como el algoritmo empleado para emparejar estrellas. El siguiente paso consiste en aplicar este algoritmo seleccionado en la sección: *Find Cross-Reference between Photometry Files*, que consiste en encontrar referencias cruzadas entre archivos de datos. El más efectivo de los tres algoritmos proporcionados por C-Munipack, con los datos de 5526, resultó ser: *Algorithm for dense fields*. Una vez concluido este procedimiento, la última etapa consiste en trazar la curva de luz (*Plot Light Curve*), para lo que es necesario seleccionar las estrellas, conforme lo explicado anteriormente, y seleccionar la apertura más óptima para el caso concreto. C-Munipack recomienda la mejor apertura para cada caso, pese a que esta puede ser cambiada fácilmente por el usuario en cualquier momento.

Como se puede observar en la Figura 22 se han seleccionado 10 estrellas de control cercanas al target y una estrella de comparación alejada de este. Como resultado se obtienen diversas gráficas, entre las que resulta muy sencillo cambiar de una a otra. A fines comparativos se van a mostrar cuatro gráficas con diferentes diámetros de apertura a la vez, en las Figuras 23, 24 y 25; aclarando que el programa muestra solo una. Las cuatro aperturas corresponden a: una muy pequeña donde se puede perder información aunque se aprecie la tendencia, una muy grande donde se pierde

la información por contaminación en la apertura y dos representativas entre ambas, una de ellas siendo la más óptima. En este caso la apertura óptima es la de 5.27, exhibiendo el menor ruido. También se emplea en el eje horizontal el tiempo universal coordinado o UTC, siendo posible utilizar también la fecha juliana, JD.

A continuación se muestran algunas de las gráficas obtenidas, las cuales se han considerado relevantes para extraer las conclusiones. En la Figura 23, se toma como estrella variable, V , el target, y se compara con la de comparación, C :

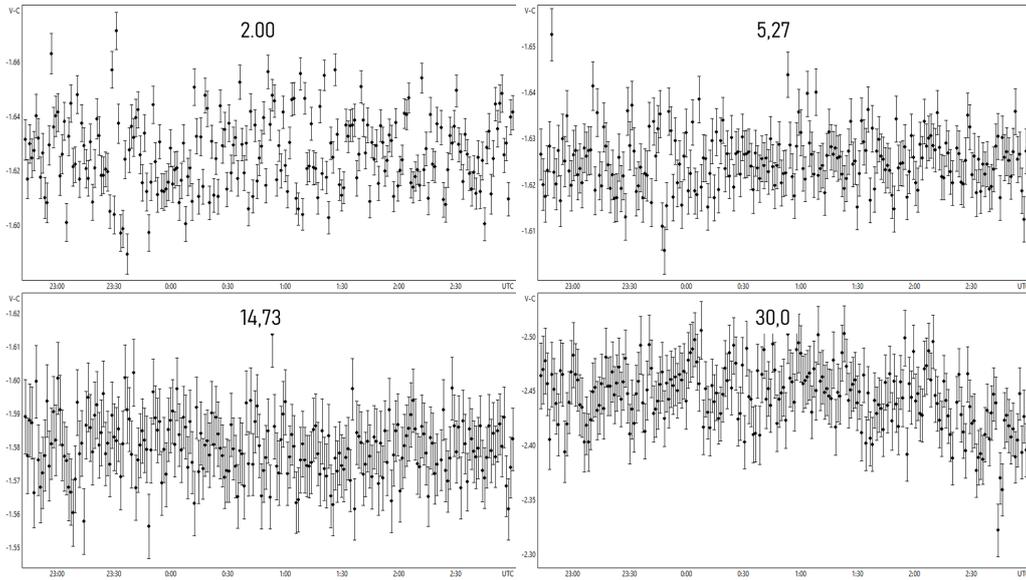


Figura 23: Gráfica de magnitudes relativas con el target como variable ($V=target$) frente a la estrella de comparación, $V - C$. Los números indican el diámetro de las aperturas en píxeles

Como se puede observar, en las cuatro, no hay ninguna variación apreciable en la curva de luz, es más bien plana. Y se confirma que la gráfica con mejor definición es la de la apertura de 5.27 píxeles.

Haciendo uso de las herramientas de C-Munipack, se puede ver como varía el target frente a las estrellas de control individualmente, donde en la llamada $K6$ existe una variación relevante, Figura 24, que no se da para las otras, pues replican el comportamiento de la Figura 23.

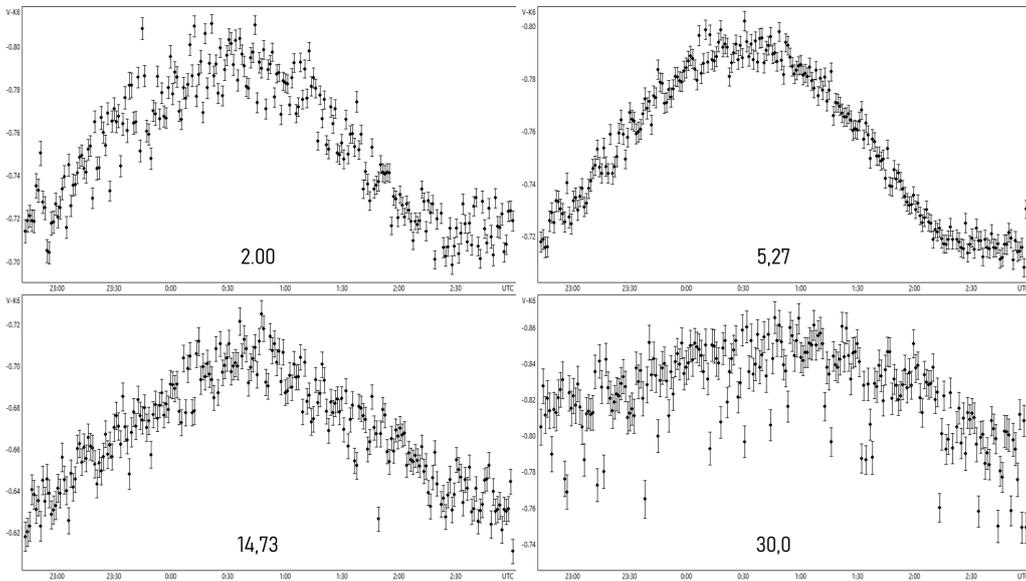


Figura 24: Gráfica con el target como variable frente a la estrella de control $K6$, $V - K6$

En este segundo conjunto de gráficas sí se puede apreciar una gran variación en la estrella de control $K6$, por lo que, al no replicarse en ninguna de las otras estrellas (lo cual se comprueba rápidamente) se puede suponer que se trata de una CEB, coincidiendo con la misma estrella encontrada en los estudios previos. Sin embargo, para una mayor seguridad se puede comparar la estrella de control frente a esta estrella, o bien, se puede realizar un segundo estudio tomando $K6$ como estrella variable, y repitiendo los pasos anteriores. Este segundo paso no es necesario, pues al realizar el primero ya es posible comparar $K6$ con el target, la estrella de comparación o cualquier otra de las de control. Tomando la variación de la estrella $K6$ frente a la de control se obtiene:

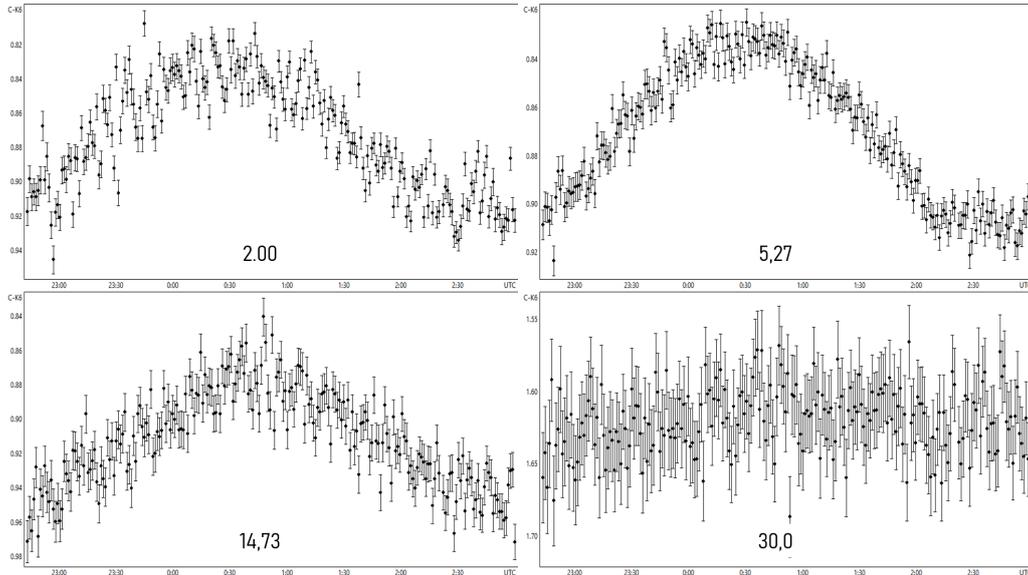


Figura 25: Gráfica de la estrella de comparación frente a $K6$, $C - K6$

En esta nueva gráfica, Figura 25, es posible observar como sigue apareciendo esa curvatura, en la estrella $K6$, que indica claramente que se trata de una CEB, que provoca una falsa alarma. En caso de tomarse $K6$ como target, al compararlo con las anteriores, la curvatura sería inversa, esto es debido orden en el que C-Munipack realiza la comparativa. Pero los resultados son equivalentes, e igual de válidos que en el estudio mostrado.

En resumen, con C-Munipack se puede realizar un estudio fiable y completo del target para confirmar o descartar un posible tránsito de forma sencilla y rápida, así como complementarlo para lograr una mayor fiabilidad de los resultados. Pero estos resultados se tienen que analizar por separado, puesto que no incluye, como hemos visto en programas anteriores, una herramienta u opción para mostrar todos los resultados en una misma gráfica, requiriendo más trabajo por parte del usuario. Esto podría ser solventado pues el programa es de código abierto y podría modificarse para que mostrase los resultados de forma unificada, aspecto de interés en el contexto de este estudio. Sin embargo, el programa no cuenta con esta opción por defecto. También es posible extraer un archivo de texto en formato tabular con los valores obtenidos por C-Munipack para la fotometría, para su análisis. Es por ello que en esta sección, por su adecuación al objetivo se le otorga:



6. SIPS

The last of the software analysed is SIPS (Scientific Image Processing System), developed by Morovian Instruments. This is a program not specifically designed for the task of interest, as it is a tool designed for the control of cameras and reduction of images provided by these, which also has a section for photometry.

SIPS has only Windows compatible versions. Its interface is simple and clear, although it has some options that are difficult to deal with.

As for the results, SIPS offers a study that is quite adequate for the objective, however, the way to get to it is complex and laborious for the user. Therefore, despite the good results, it does not get full marks in this section.

El último de los softwares considerados en este estudio es SIPS (Morovian-Instruments, 2024), cuyas siglas provienen del inglés: *Scientific Image Processing System*. Se trata de un paquete de software para el control de cámaras, manejo de series de exposición, guiado automático, control de ruedas de filtros, monturas de telescopio, enfocadores, cúpulas de observatorio, etc. Y se incluye como candidato ya que, además, contiene herramientas para la calibración de imágenes, apilamiento de imágenes, reducción astrométrica de imágenes, fotometría de series temporales, que son las que se van a evaluar.

El software desarrollado por *Morovian Instruments*, actualmente cuenta con mantenimiento, siendo la última versión disponible en la fecha de realización de este documento: *SIPS v4*.

6.1. Proceso de instalación

El proceso de instalación de SIPS es estándar, estando disponible en su web todo lo necesario para su descarga e instalación. Sin embargo, esta aparece disponible únicamente para Windows. Existen *drivers* para el control de las cámaras para Linux y Mac OS, pero no para la realización de la fotometría.

Es por ello que, dado el objetivo de la misión, como se vio en el caso de C-Munipack, puede generar problemas en aquellos usuarios que no dispongan de equipos compatibles con Windows. Por ello, la calificación es:



6.2. Acceso y calidad de la documentación

SIPS cuenta con diferentes fuentes de información del software, algunas se encuentran en la propia web de los desarrolladores, aunque más enfocadas al control de los diferentes modelos de cámaras compatibles con SIPS, y la principal empleada en el desarrollo de este análisis se encuentra dentro del propio software, la guía de usuario. Esta se encuentra entre los archivos de descarga, y una vez iniciado el software existe una opción para ir a ella en el apartado de *Help* de la pantalla inicial. Esta guía es muy completa y extensa, pudiendo consultar las funciones de cada una de las diferentes herramientas así como el orden de aplicación de las mismas para lograr los resultados deseados.

Por la facilidad del acceso y la claridad de la documentación existente, además de otras fuentes complementarias, la calificación en este apartado para SIPS es:



6.3. Interfaz de usuario

La interfaz de SIPS es similar a la de C-Munipack en forma, y contando con todas las opciones principales del programa a la vista en la interfaz inicial, como se puede apreciar en la Figura 26. En este estudio sólo se tomarán en cuenta aquellas funciones relacionadas o necesarias al estudio de la fotometría de las imágenes, excluyendo así las propias del control de cámaras o las de edición y reducción de las imágenes.

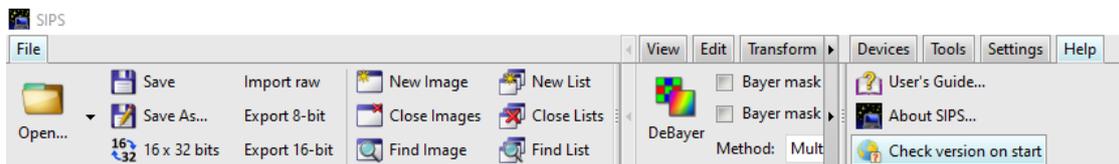


Figura 26: Interfaz de SIPS

Una vez cargadas las imágenes, se puede acceder a una interfaz diferente en el apartado *Tools*, llamada *Photometry*, generándose un nuevo panel con las opciones para generar las curvas de luz:

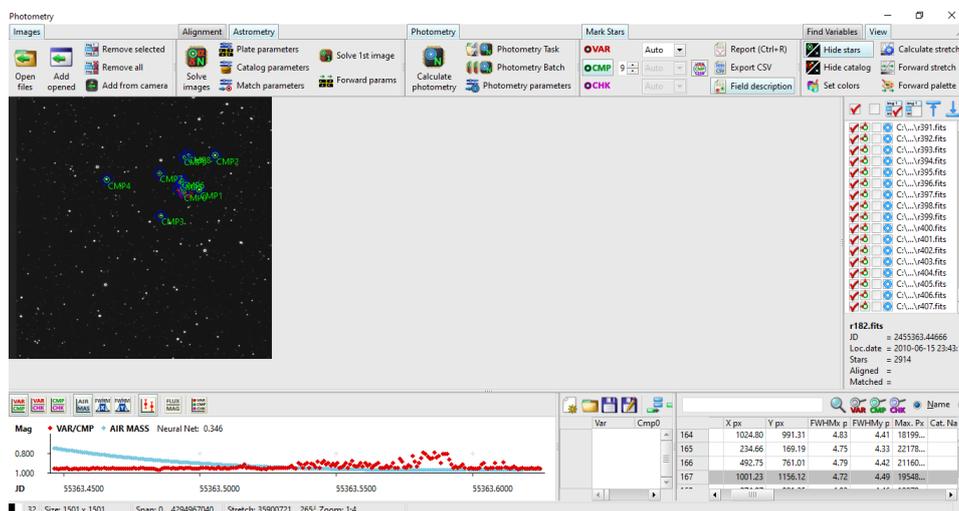


Figura 27: Interfaz de fotometría de SIPS

En la Figura 27 se observan las opciones con las que cuenta SIPS, las cuales se tratan en la siguiente sección.

Se trata de una interfaz simple y sencilla, lo cual ayuda al usuario a familiarizarse con el entorno de trabajo de una forma sencilla. Pero en ella también hay detalles que limitan la comodidad durante la realización de la fotometría, como es el hecho de que no haya opción de mostrar las coordenadas en las que se encuentra el cursor cuando se desplaza sobre la imagen, lo que dificulta el proceso de selección de las estrellas para el estudio.

Por estos detalles, la calificación otorgada a SIPS es:



6.4. Resultados

Antes de realizar el análisis de los resultados ofrecidos por SIPS como tal, es necesario destacar que las imágenes del 5526 con las que se cuenta para este estudio son ficheros ya procesados y alineados, como consecuencia contienen *32-bits floating point pixels*, sin embargo, SIPS emplea *32-bits integer pixels*. El software es capaz de realizar la conversión, pero el usuario ha de aceptar

esta imagen a imagen, pues no existe una forma de realizarla de todas las imágenes de forma simultánea. Convirtiendo este paso previo en uno laborioso que consume una cantidad no despreciable de tiempo.

Una vez cargadas las imágenes ya en el panel que se ve en la Figura 27, los pasos a seguir son los que aparecen en el menú superior de izquierda a derecha, *Alignment*, *Astrometry* y *Photometry*. El primero de ellos consiste en el reconocimiento y alineación de las estrellas presentes en las imágenes, para una optimización de este proceso el usuario puede modular los parámetros de esta búsqueda, tratándose de un paso necesario. El segundo paso, el llamado *Astrometry*, consiste en la búsqueda de referencias cruzadas con catálogos estelares. SIPS cuenta con cuatro de ellos: UCAC4, UCAC5, USNO-A2.0 y USNO-B1.0, dando la opción al usuario de incluir más si se cuenta con ellos descargados en el equipo. Este paso dio problemas en la realización de este estudio, pues no fue posible hallar unos parámetros adecuados para que estos catálogos funcionasen, pero se trata de un paso no estrictamente necesario, así que se decidió suprimirlo. El último, *Photometry*, es un paso totalmente necesario para el objetivo. En él el usuario ha de seleccionar los radios de las aperturas para la fotometría, valores clave como se vio anteriormente, y una vez dados estos parámetros SIPS realiza los cálculos de todas las estrellas reconocidas en el primer paso, para posteriormente ser el usuario el que seleccione los valores a comparar.

SIPS realiza los cálculos de la forma estándar, dando la opción al usuario de variar de forma sencilla entre representarlos en función de la magnitud o del flujo. En las siguientes gráficas aparecen estos en función de la magnitud, pero con el eje vertical invertido, por lo que su forma es igual a la representación en función del flujo. Para los cálculos SIPS define las mismas tres figuras que se emplearon en el caso de C-Munipack, variables, estrellas de comparación y estrellas de control. Para el caso estudiado de 5526 emplearemos 10 estrellas de comparación, alternando cada una de ellas a estrella de control para que nos permita representar su variación frente al target, pues SIPS da tres opciones de comparación: Variable (target) frente a la de Comparación (una estrella sintética, como promedio de las estrellas seleccionadas), Variable frente a la estrella de Control o entre la de Comparación y la estrella de Control. Con ello se genera una gráfica en la que además aparece información (que podemos suprimir) de la masa de aire y de FWHM tanto en x como en y. Obtenemos la gráfica general (Figura 28), que posteriormente particularizamos en las Figuras 29, 30 y 31, a cada una de las curvas para mayor detalle:

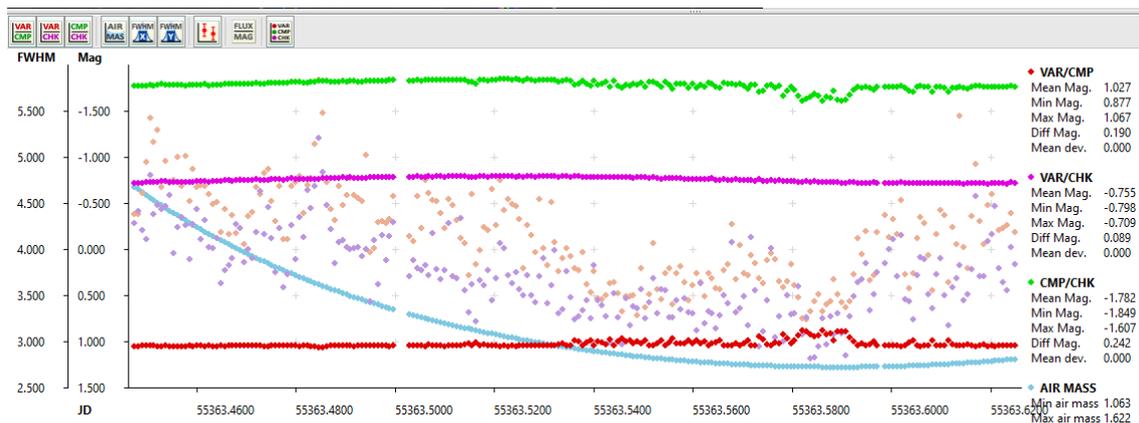


Figura 28: Gráfica con todas las curvas de SIPS. Aparecen las comparativas mencionadas, con el target como (VAR), la estrella de comparación (CMP) y la de control (CHK), y la información complementaria de la masa de aire y FWHM

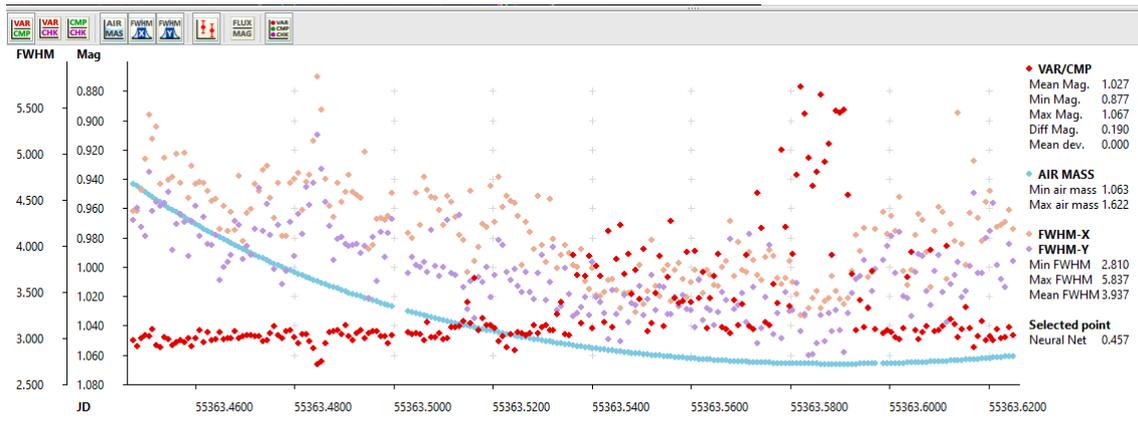


Figura 29: Gráfica del target, *VAR*, frente a la estrella de comparación, *CMP* (VAR/CMP)

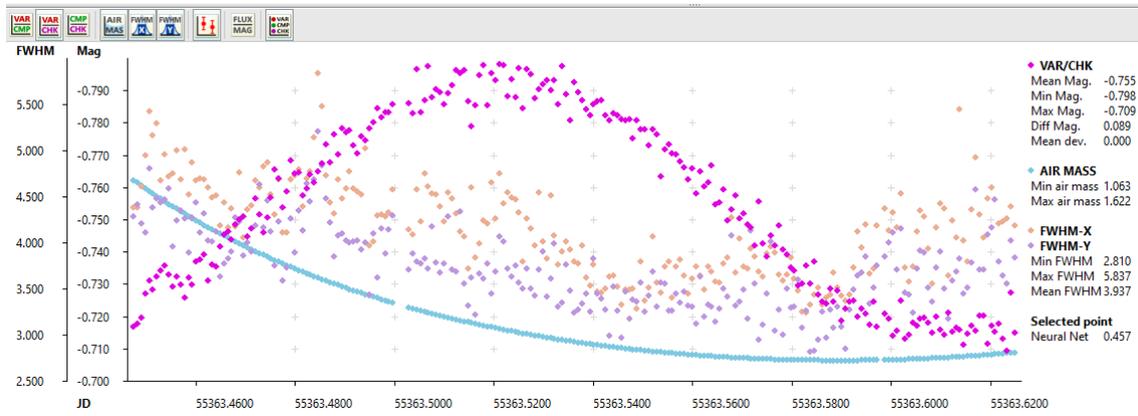


Figura 30: Gráfica del target, *VAR*, frente a la estrella de control, *CHK*, contaminante (VAR/CHK)

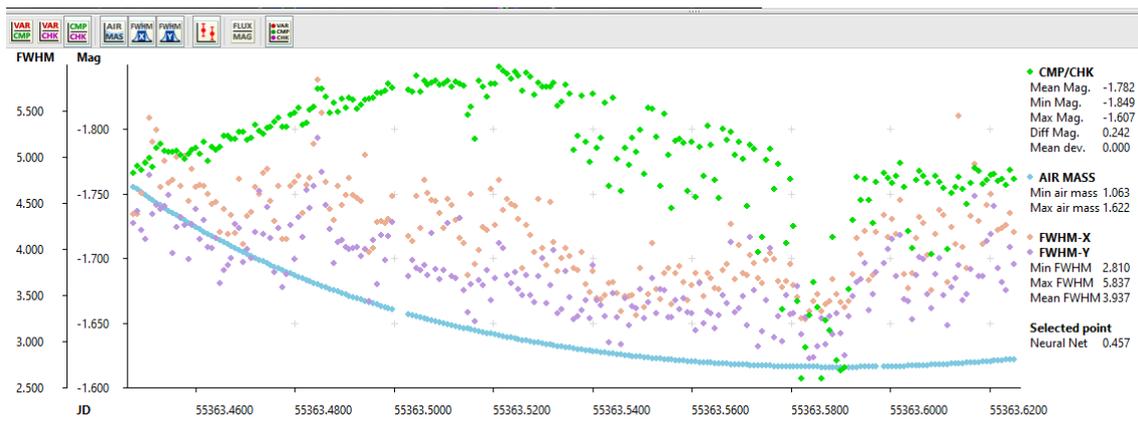


Figura 31: Gráfica de la estrella de comparación, *CMP*, frente a la estrella de control, *CHK* (CMP/CHK)

En las gráficas correspondientes a las Figuras 29 y 31 se aprecia claramente la distorsión en los valores en la zona derecha de la misma. También podemos identificar en las Figuras 30 y 31, en contraposición a la 29, que la variación detectada por el satélite no se debe al target si no a una estrella contaminante, que se corresponde a la ya conocida por los estudios anteriores.

Por lo tanto, es posible realizar el estudio pretendido con detalle, sin embargo, el mismo resulta ser más laborioso que en los casos anteriores, pues el hecho de no reconocer los catálogos dificulta

mucho la selección de estrellas, pues las coordenadas de las mismas no aparecen hasta después de seleccionadas. Además, aunque todos los cálculos se realicen a la vez, y en este caso la estrella contaminante ya era conocida, se realizó el estudio sin tener esto en cuenta, y para localizarla hay que ir cambiando una a una las estrellas de comparación por la estrella de control hasta dar con la que genera la falsa alarma. También, se tiene en cuenta en la calificación que del estudio se puede extraer un fichero de texto con los valores (como en los casos anteriores), pero el de SIPS únicamente posee los valores de la curva de luz de la estrella escogida como variable, su magnitud, y la hora juliana; no contiene la información de las estrellas de comparación o de control elegidas. Asimismo carece de otros datos adicionales relevantes en este fichero. Es por ello que, pese a que los resultados sean adecuados y completos, la calificación de este apartado para SIPS es:



7. Comparativa de los resultados y conclusiones

This final section attempts to summarise the whole of the above study and to draw the final conclusions from the analysis of the software packages. Figure 32 is a summary of the individual ratings. Through equation (6), the total numerical ratings are obtained, shown in Table 1 and Figure 33.

This allows for the distinction between two sets of programmes. The first set consists of AstroImageJ and C-Munipack, which are suitable and recommended for the given task; while the packages of the second set, formed by Siril and SIPS, are less suitable due to limitations in their use. Among all of these, AIJ is the most recommended for this research, given its completeness and the additional information it provides in the results.

En esta última sección se trata de resumir todo el estudio anteriormente expuesto, así como dar las conclusiones finales del análisis de los paquetes de software. La revisión exhaustiva de estos ha permitido obtener una visión clara de sus capacidades, ventajas y limitaciones. Para ello se definieron cuatro categorías independientes, con tal de conseguir eliminar posibles sesgos de la evaluación. En el siguiente gráfico de barras, Figura 32, se recopilan las calificaciones otorgadas a cada una de las categorías para los cuatro softwares evaluados:

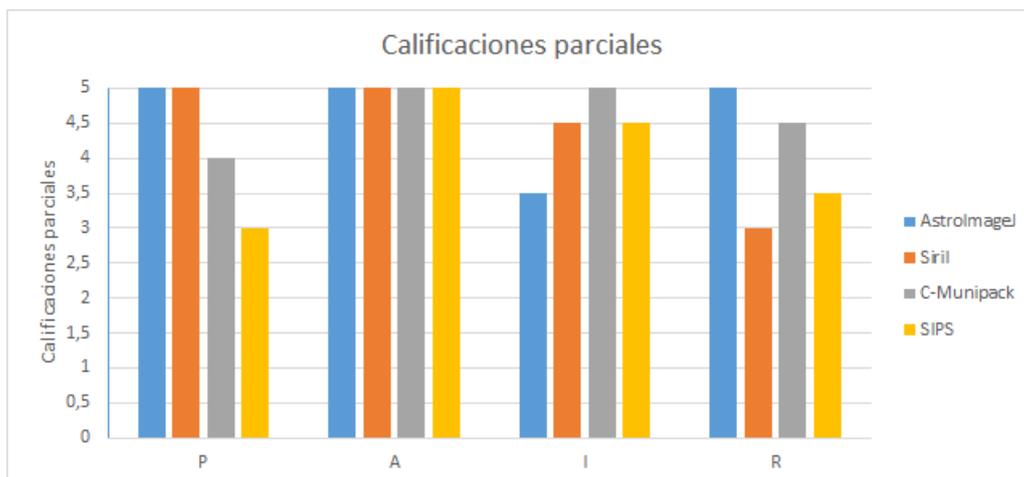


Figura 32: Calificaciones parciales para cada sección de los softwares evaluados. Siendo: *P* Proceso de instalación, *A* Acceso y calidad de la documentación, *I* Interfaz de usuario, *R* Resultados

Una vez analizado de forma individual cada uno de los paquetes de software, a fines comparativos se emplea la ecuación (6) para obtener un valor numérico que condense esta información.

Tabla 1: Valor numérico de las calificaciones finales empleando la fórmula

Paquete de software	Calificación
AstroImageJ	4.7
Siril	4.1
C-Munipack	4.6
SIPS	3.9

Para ofrecer una mejor comparativa visual, se genera un nuevo gráfico de barras con los datos de la Tabla 1 (Figura 33).

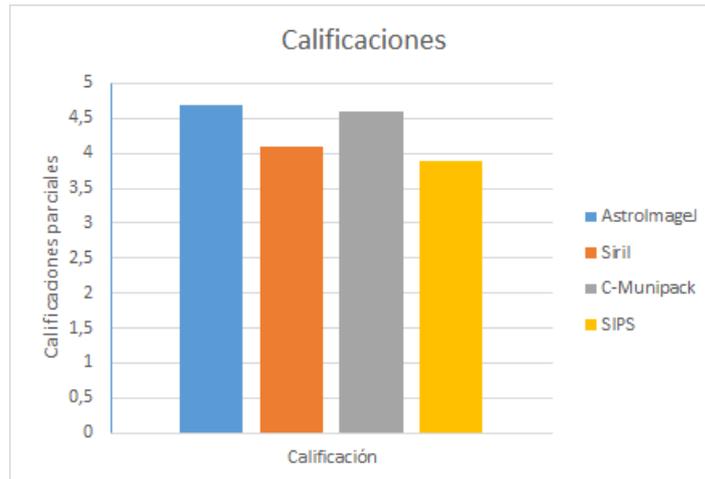


Figura 33: Calificaciones obtenidas para cada software empleando la fórmula

Tanto en la Tabla 1 como en la Figura 33, se pueden diferenciar dos conjuntos de programas según sus calificaciones. El primer grupo estaría compuesto por: AstroImageJ y C-Munipack ($C \geq 4.25$); y el segundo por: Siril y SIPS ($C < 4.25$). A pesar de poder realizarse esta distinción, todos los programas analizados han resultado ser aptos para el objetivo de la misión.

Empezando por el análisis del segundo grupo, Siril y SIPS, resultan ser softwares aptos para el objetivo del estudio, pero presentan limitaciones en sus funcionalidades. Mientras que es posible realizar una fotometría precisa y discernir si la alarma generada por el satélite es una alarma falsa o un tránsito verdadero (Figura 5), ambos programas tienen carencias en su funcionamiento. Siril, por su parte, limita la comparación visual, si no se cuenta con herramientas externas, una vez se incluye un gran número de estrellas de comparación en el estudio; además de dar problemas con el reconocimiento del campo empleando catálogos estelares. Por otra parte, SIPS, solo es compatible con un sistema operativo (Windows) lo cual es problemático con la naturaleza del programa de seguimiento terrestre, y también resulta muy laboriosa la selección de las estrellas si no se consigue hacer funcionar el reconocimiento por catálogos, siendo un paso no obligatorio; en adición a lo anterior, SIPS aporta un fichero de texto con los datos calculados únicamente del target (o la estrella seleccionada como variable), siendo esta información escasa para poder realizar análisis más extensos y necesarios en el contexto de este estudio. Por tanto, ambos posibilitan cumplir con el objetivo con unos estándares de calidad elevados, pero el proceso resulta laborioso y no aportan información añadida a los resultados.

En lo que respecta al análisis del primer grupo, conformado por: AstroImageJ y C-Munipack, no solo resultan ser aptos, sino que también se destacan como altamente recomendables dado el contexto y objetivo de la misión PLATO. AstroImageJ destaca por su completitud, debido a su gran cantidad de opciones disponibles y la claridad con la que se exponen sus resultados pues los presenta de forma conjunta, siendo muy sencilla la comparación visual; pese a tener la curva de aprendizaje más exigente, una vez adaptado como usuario a las peculiaridades del programa, su manejo resulta sencillo y práctico. Además, AIJ, aporta una gran cantidad de datos complementarios a los cálculos de la fotometría, permitiendo realizar estudios más exhaustivos. Por otra parte,

C-Munipack, resalta por su sencillez, la facilidad de adaptación y por la calidad de los resultados obtenidos; sin embargo, no es compatible con Mac OS, asimismo no posee una opción para representar los resultados de forma conjunta. Este es un problema que puede ser resuelto modificando el código del programa, que es de libre acceso. En síntesis, ambos paquetes no sólo logran cumplir con el objetivo de la misión, si no que aportan un valor añadido al estudio.

Como conclusión de este estudio, AstroImageJ resulta como el candidato más óptimo para la tarea requerida. Seguido por C-Munipack, como una herramienta de calidad, y más sencilla de emplear. Y Siril y SIPS como softwares aptos para realizar la fotometría también con una alta precisión, pero no libres de inconvenientes.

Una de las limitaciones encontradas en el estudio, acerca de la metodología empleada, ha sido la evolución de la experiencia del autor en el campo, debido a que en las fases iniciales no contaba con ella, y ha sido adquirida durante el transcurso de la investigación. La adaptación a la terminología y a las funciones, el entendimiento de los principios fotométricos así como la mejora en la interpretación de los resultados, han podido sesgar el análisis por no darse en condiciones de total igualdad.

Referencias

- Brown, T. M. (2003). Expected Detection and False Alarm Rates for Transiting Jovian Planets. , 593(2):L125–L128.
- Collins, K. A., Kielkopf, J. F., Stassun, K. G., and Hessman, F. V. (2017). AstroImageJ: Image Processing and Photometric Extraction for Ultra-precise Astronomical Light Curves. , 153(2):77.
- Deeg, H. J. (2013). VAPHOT: Precision differential aperture photometry package. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1309.002.
- Deeg, H. J. and Alonso, R. (2018). Transit Photometry as an Exoplanet Discovery Method. In Deeg, H. J. and Belmonte, J. A., editors, *Handbook of Exoplanets*, page 117.
- Deeg, H. J. and Alonso, R. (2024). Ground-based photometric follow-up for exoplanet detections with the PLATO mission. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 54(2):142–149.
- Deeg, H. J., Gillon, M., Shporer, A., Rouan, D., Stecklum, B., Aigrain, S., Alapini, A., Almenara, J. M., Alonso, R., Barbieri, M., Bouchy, F., Eislöffel, J., Erikson, A., Fridlund, M., Eigmüller, P., Handler, G., Hatzes, A., Kabath, P., Lendl, M., Mazeh, T., Moutou, C., Queloz, D., Rauer, H., Rabus, M., Tingley, B., and Titz, R. (2009). Ground-based photometry of space-based transit detections: photometric follow-up of the CoRoT mission. , 506(1):343–352.
- Deleuil, M., Meunier, J. C., Moutou, C., Surace, C., Deeg, H. J., Barbieri, M., Debosscher, J., Almenara, J. M., Agneray, F., Granet, Y., Guterman, P., and Hodgkin, S. (2009). Exo-Dat: An Information System in Support of the CoRoT/Exoplanet Science. , 138(2):649–663.
- ESA (2022). Plato factsheet. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Plato_factsheet.
- Hebb, L., Collier-Cameron, A., Loeillet, B., Pollacco, D., Hébrard, G., Street, R. A., Bouchy, F., Stempels, H. C., Moutou, C., Simpson, E., Udry, S., Joshi, Y. C., West, R. G., Skillen, I., Wilson, D. M., McDonald, I., Gibson, N. P., Aigrain, S., Anderson, D. R., Benn, C. R., Christian, D. J., Enoch, B., Haswell, C. A., Hellier, C., Horne, K., Irwin, J., Lister, T. A., Maxted, P., Mayor, M., Norton, A. J., Parley, N., Pont, F., Queloz, D., Smalley, B., and Wheatley, P. J. (2009). WASP-12b: The Hottest Transiting Extrasolar Planet Yet Discovered. , 693(2):1920–1928.
- Moravian-Instruments (2024). Moravian instruments, sips v4. <https://www.gxccd.com/art?id=733cat=1lang=409>.
- Motl, D. (2011). C-munipack: Package of software utilities for reducing astronomy ccd images intended on a observation of variable stars. <https://c-munipack.sourceforge.net/>.
- Motl, D. (2024). C-munipack 2.1 - user’s manual. <https://c-munipack.sourceforge.net/>.
- Perryman, M. (2018). *Transits*, page 153–328. Cambridge University Press.
- Rauer, H., Aerts, C., Cabrera, J., Deleuil, M., Erikson, A., Gizon, L., Goupil, M., Heras, A., Lorenzo-Alvarez, J., Marliani, F., Martin-Garcia, C., Mas-Hesse, J. M., O’Rourke, L., Osborn, H., Pagano, I., Piotto, G., Pollacco, D., Ragazzoni, R., Ramsay, G., Udry, S., Appourchaux, T., Benz, W., Brandeker, A., Güdel, M., Janot-Pacheco, E., Kabath, P., Kjeldsen, H., Min, M., Santos, N., Smith, A., Suarez, J.-C., Werner, S. C., Aboudan, A., Abreu, M., Acuña, L., Adams, M., Adibekyan, V., Affer, L., Agneray, F., Agnor, C., Aguirre Børsen-Koch, V., Ahmed, S., Aigrain, S., Al-Bahlawan, A., Alcacera Gil, M. d. l. A., Alei, E., Alencar, S., Alexander, R., Alfonso-Garzón, J., Alibert, Y., Allende Prieto, C., Almeida, L., Alonso Sobrino, R., Altavilla, G., Althaus, C., Alonso Alvarez Trujillo, L., Amarsi, A., Ammler-von Eiff, M., Amôres, E., Andrade, L., Antoniadis-Karnavas, A., António, C., Aparicio del Moral, B., Appolloni, M., Arena, C., Armstrong, D., Aroca Aliaga, J., Asplund, M., Audenaert, J., Auricchio, N., Avelino, P., Baeke, A., Baillié, K., Balado, A., Balestra, A., Ball, W., Ballans, H., Ballot, J., Barban, C., Barbary, G., Barbieri, M., Barceló Forzeza, S., Barker, A., Barklem, P., Barnes, S., Barrado Navascues, D., Barragan, O., Baruteau, C., Basu, S., Baudin, F., Baumeister, P., Bayliss, D., Bazot, M., Beck, P. G., Bedding, T., Belkacem, K., Bellinger, E., Benatti, S., Benomar, O., Bérard, D., Bergemann, M., Bergomi, M., Bernardo, P., Biazzo, K., Bignamini, A., Bigot, L., Billot, N., Binet, M., Biondi,

D., Biondi, F., Birch, A. C., Bitsch, B., Bluhm Ceballos, P. V., Bódi, A., Bognár, Z., Boisse, I., Bolmont, E., Bonanno, A., Bonavita, M., Bonfanti, A., Bonfils, X., Bonito, R., Bonomo, A. S., Börner, A., Boro Saikia, S., Borreguero Martín, E., Borsa, F., Borsato, L., Bossini, D., Bouchy, F., Boué, G., Bouffleur, R., Boumier, P., Bourrier, V., Bowman, D. M., Bozzo, E., Bradley, L., Bray, J., Bressan, A., Breton, S., Brienza, D., Brito, A., Brogi, M., Brown, B., Brown, D., Brun, A. S., Bruno, G., Bruns, M., Buchhave, L. A., Bugnet, L., Buldgen, G., Burgess, P., Busatta, A., Busso, G., Buzasi, D., Caballero, J. A., Cabral, A., Calderone, F., Cameron, R., Cameron, A., Campante, T., Canto Martins, B. L., Cara, C., Carone, L., Carrasco, J. M., Casagrande, L., Casewell, S. L., Cassisi, S., Castellani, M., Castro, M., Catala, C., Catalán Fernández, I., Catelan, M., Cegla, H., Cerruti, C., Cessa, V., Chadid, M., Chaplin, W., Charpinet, S., Chiappini, C., Chiarucci, S., Chiavassa, A., Chinellato, S., Chirulli, G., Christensen-Dalsgaard, J., Church, R., Claret, A., Clarke, C., Claudi, R., Clermont, L., Coelho, H., Coelho, J., Cogato, F., Colomé, J., Condamin, M., Conseil, S., Corbard, T., Correia, A. C. M., Corsaro, E., Cosentino, R., Costes, J., Cottinelli, A., Covone, G., Creevey, O. L., Crida, A., Csizmadia, S., Cunha, M., Curry, P., da Costa, J., da Silva, F., Dalal, S., Damasso, M., Damiani, C., Damiani, F., Liduina das Chagas, M., Davies, M., Davies, G., Davies, B., Davison, G., de Almeida, L., de Angeli, F., Cabral de Barros, S. C., de Castro Leão, I., Brito de Freitas, D., de Freitas, M. C., De Martino, D., Renan de Medeiros, J., de Paula, L. A., de Plaa, J., De Ridder, J., Deal, M., Decin, L., Deeg, H., Degl'Innocenti, S., Deheuvels, S., del Burgo, C., Del Sordo, F., Delgado-Mena, E., Demangeon, O., Denk, T., Derekas, A., Desidera, S., Dexet, M., Di Criscienzo, M., Di Giorgio, A. M., Di Mauro, M. P., Diaz Rial, F. J., Díaz-García, J.-J., Dima, M., Dinuzzi, G., Dionatos, O., Distefano, E., do Nascimento, Jose-Dias, J., Domingo, A., D'Orazi, V., Dorn, C., Doyle, L., Duarte, E., Ducellier, F., Dumaye, L., Dumusque, X., Dupret, M.-A., Eggenberger, P., Ehrenreich, D., Eigmüller, P., Eising, J., Emilio, M., Eriksson, K., Ermocida, M., Isidoro Escate Giribaldi, R., Eschen, Y., Estrela, I., Evans, D. W., Fabbian, D., Fabrizio, M., Faria, J. P., Farina, M., Farinato, J., Feliz, D., Feltzing, S., Fenouillet, T., Ferrari, L., Ferraz-Mello, S., Fialho, F., Fienga, A., Figueira, P., Fiori, L., Flaccomio, E., Focardi, M., Foley, S., Fontignie, J., Ford, D., Fornazier, K., Forveille, T., Fossati, L., de Marca Franca, R., da Silva, L. F., Frasca, A., Fridlund, M., Furlan, M., Gabler, S.-M., Gaido, M., Gallagher, A., Galli, E., Garcia, R. A., García Hernández, A., Garcia Munoz, A., García-Vázquez, H., Garrido Haba, R., Gaulme, P., Gauthier, N., Gehan, C., Gent, M., Georgieva, I., Ghigo, M., Giana, E., Gill, S., Girardi, L., Giuliatti Winter, S., Giusi, G., Gomes da Silva, J., Gómez Zazo, L. J., Gomez-Lopez, J. M., Isai González Hernández, J., Gonzalez Murillo, K., Gorius, N., Gouel, P.-V., Goult, D., Granata, V., Grenfell, J. L., Griebbach, D., Grolleau, E., Grouffal, S., Grziwa, S., Guarcello, M. G., Gueguen, L., Guenther, E. W., Guilhem, T., Guillerot, L., Guiot, P., Guterman, P., Gutiérrez, A., Gutiérrez-Canales, F., Hagelberg, J., Haldemann, J., Hall, C., Handberg, R., Harrison, I., Harrison, D. L., Hasiba, J., Haswell, C. A., Hatalova, P., Hatzes, A., Haywood, R., Hébrard, G., Heckes, F., Heiter, U., Hekker, S., Heller, R., Helling, C., Helminiak, K., Hemsley, S., Heng, K., Hermans, A., Hermes, J., Hidalgo Torres, N., Hinkel, N., Hobbs, D., Hodgkin, S., Hofmann, K., Hojjatpanah, S., Houdek, G., Huber, D., Huesler, J., Hui-Bon-Hoa, A., Huygen, R., Huynh, D.-D., Iro, N., Irwin, J., Irwin, M., Izidoro, A., Jacquino, S., Emborg Janssen, N., Janson, M., Jezszsky, H., Jiang, C., José Jimenez Mancebo, A., Jofre, P., Johansen, A., Johnston, C., Jones, G., Kallinger, T., Kálmán, S., Kanitz, T., Karjalainen, M., Karjalainen, R., Karoff, C., Kawaler, S., Kawata, D., Keereman, A., Keiderling, D., Kennedy, T., Kenworthy, M., Kerschbaum, F., Kidger, M., Kiefer, F., Kintziger, C., Kislyakova, K., Kiss, L., Klagyivik, P., Klahr, H., Klevas, J., Kochukhov, O., Köhler, U., Kolb, U., Koncz, A., Korth, J., Kostogryz, N., Kovács, G., Kovács, J., Kozhura, O., Krivova, N., Kučinskas, A., Kuhlemann, I., Kupka, F., Laauwen, W., Labiano, A., Lagarde, N., Laget, P., Laky, G., Lam, K. W. F., Lambrechts, M., Lammer, H., Lanza, A. F., Lanzafame, A., Lares Martiz, M., Laskar, J., Latter, H., Lavanant, T., Lawrenson, A., Lazzoni, C., Lebre, A., Lebreton, Y., Lecavelier des Etangs, A., Leinhardt, Z., Leleu, A., Lendl, M., Leto, G., Levillain, Y., Libert, A.-S., Lichtenberg, T., Ligi, R., Lignieres, F., Lillo-Box, J., Linsky, J., Scige Liu, J., Loidolt, D., Longval, Y., Lopes, I., Lorenzani, A., Ludwig, H.-G., Lund, M., Sloth Lundkvist, M., Luri, X., Maceroni, C., Madden, S., Madhusudhan, N., Maggio, A., Magliano, C., Magrin, D., Mahy, L., Maibaum, O., Malac-Allain, L., Malapert, J.-C., Malavolta, L., Maldonado, J., Mamonova, E., Manchon, L., Mann, A., Mantovan, G., Marafatto, L., Marconi, M., Mardling, R., Marigo, P., Marinoni, S., Marques, É., Marques, J. P., Marrese, P. M., Marshall, D., Martínez Perales, S., Mary, D., Marzari, F., Masana, E., Mascher, A., Mathis, S., Mathur, S., Mattiuci Figueiredo, A. C., Maxted, P. F. L., Mazeh, T., Mazevet,

S., Mazzei, F., McCormac, J., McMillan, P., Menou, L., Merle, T., Meru, F., Mesa, D., Messina, S., Mészáros, S., Meunier, N., Meunier, J.-C., Micela, G., Michaelis, H., Michel, E., Michielsen, M., Michtchenko, T., Miglio, A., Miguel, Y., Milligan, D., Mirouh, G., Mitchel, M., Moedas, N., Molendini, F., Molnár, L., Mombarg, J., Montalbán, J., Montalto, M., Monteiro, M. J. P. F. G., Morales, J. C., Morales-Calderon, M., Morbidelli, A., Mordasini, C., Moreau, C., Morel, T., Morello, G., Morin, J., Mortier, A., Mosser, B., Mourard, D., Mousis, O., Moutou, C., Mowlavi, N., Moya, A., Muehlmann, P., Muirhead, P., Munari, M., Musella, I., Mustill, A. J., Nardetto, N., Nardiello, D., Narita, N., Nascimbeni, V., Nash, A., Neiner, C., Nelson, R. P., Nettelmann, N., Nicolini, G., Nielsen, M., Niemi, S.-M., Noack, L., Noels-Grotsch, A., Noll, A., Norazman, A., Norton, A. J., Nsamba, B., Ofir, A., Ogilvie, G., Olander, T., Olivetto, C., Olofsson, G., Ong, J., Ortolani, S., Oshagh, M., Ottacher, H., Ottensamer, R., Ouazzani, R.-M., Paardekooper, S.-J., Pace, E., Pajas, M., Palacios, A., Palandri, G., Palle, E., Papproth, C., Parro, V., Parviainen, H., Granada, J. P., Passegger, V. M., Pastor-Morales, C., Pätzold, M., Gade Pedersen, M., Pena Hidalgo, D., Pepe, F., Pereira, F., Persson, C. M., Pertenais, M., Peter, G., Petit, A. C., Petit, P., Pezzuto, S., Pichierri, G., Pietrinferni, A., Pinheiro, F., Pinsonneault, M., Plachy, E., Plasson, P., Plez, B., Poppenhaeger, K., Poretti, E., Portaluri, E., Portell, J., Frederico Porto de Mello, G., Poyatos, J., Pozuelos, F. J., Prada Moroni, P. G., Pricopi, D., Prisinzano, L., Quade, M., Quirrenbach160, n., Rabanal Reina6, J. A., Rabello Soares, M. C., Raimondo, G., Rainer, M., Ramón Rodón, J., Ramón-Ballesta, A., Ramos Zapata, G., Rätz, S., Rauterberg, C., Redman, B., Redmer, R., Reese, D., Regibo, S., Reiners, A., Reinhold, T., Renie, C., Ribas, I., Ribeiro, S., Pereira Ricciardi, T., Rice, K., Richard, O., Riello, M., Rieutord, M., Ripepi, V., Rixon, G., Rockstein, S., Rodríguez, M. T. R., Rodríguez Díaz, L. F., Rodríguez Garcia, J. P., Rodriguez-Gomez, J., Roehly, Y., Roig, F., Rojas-Ayala, B., Rolf, T., Lysgaard Rørsted, J., Rosado, H., Rosotti, G., Roth, O., Roth, M., Rousseau, A., Roxburgh, I., Roy, F., Royer, P., Ruane, K., Rufini Mastropasqua, S., Ruiz de Galarreta, C., Russi, A., Saar, S., Saillenfest, M., Salaris, M., Salmon, S., Saltas, I., Samadi, R., Samadi, A., Samra, D., Sanches da Silva, T., Andrés Sánchez Carrasco, M., Santerne, A., Santoli, F., Santos, Á. R. G., Sanz Mesa, R., Sarro, L. M., Scandariato, G., Schäfer, M., Schlafly, E., Schmider, F.-X., Schneider, J., Schou, J., Schunker, H., Jörg Schwarzkopf, G., Serenelli, A., Seynaeve, D., Shan, Y., Shapiro, A., Shipman, R., Sicilia, D., Sierra Sanmartin, M. A., Sigot, A., Silliman, K., Silvotti, R., Simon, A. E., Simoyama Napoli, R., Skarka, M., Smalley, B., Smiljanic, R., Smit, S., Smith, A., Smith, L., Snellen, I., Sódor, Á., Sohl, F., Solanki, S. K., Sortino, F., Sousa, S., Southworth, J., Souto, D., Sozzetti, A., Stamatellos, D., Stassun, K., Steller, M., Stello, D., Stelzer, B., Stiebel, U., Stokholm, A., Storelvmo, T., Strassmeier, K., Strøm, P. A., Strugarek, A., Sulis, S., Švanda, M., Szabados, L., Szabó, R., Szabó, G. M., Szuszkiewicz, E., Talens, G. J., Teti, D., Theisen, T., Thévenin, F., Thoul, A., Tiphene, D., Titz-Weider, R., Tkachenko, A., Tomecki, D., Tonfat, J., Tosi, N., Trampedach, R., Traven, G., Triaud, A., Trønnes, R., Tsantaki, M., Tschentscher, M., Turin, A., Tvaruzka, A., Ulmer, B., Ulmer-Moll, S., Ulusoy, C., Umbriaco, G., Valencia, D., Valentini, M., Valio, A., Valverde Guisjarro, Á. L., Van Eylen, V., Van Grootel, V., van Kempen, T. A., Van Reeth, T., Van Zelst, I., Vandenbussche, B., Vasiliou, K., Vasilyev, V., Vaz de Mascarenhas, D., Vazan, A., Vela Nunez, M., Nunes Velloso, E., Ventura, R., Ventura, P., Venturini, J., Trallero, I. V., Veras, D., Verdugo, E., Verma, K., Vibert, D., Vicanek Martinez, T., Vida, K., Vigan, A., Villacorta, A., Villaver, E., Villaverde Aparicio, M., Viotto, V., Vorobyov, E., Vorontsov, S., Wagner, F. W., Walloschek, T., Walton, N., Walton, D., Wang, H., Waters, R., Watson, C., Wedemeyer, S., Weeks, A., Weingril, J., Weiss, A., Wendler, B., West, R., Westerdorff, K., Westphal, P.-A., Wheatley, P., White, T., Whittaker, A., Wickhusen, K., Wilson, T., Windsor, J., Winter, O., Lykke Winther, M., Winton, A., Witteck, U., Witzke, V., Woitke, P., Wolter, D., Wuchterl, G., Wyatt, M., Yang, D., Yu, J., Zanmar Sanchez, R., Rosa Zapatero Osorio, M., Zechmeister, M., Zhou, Y., Ziemke, C., and Zwintz, K. (2024). The PLATO Mission. *arXiv e-prints*, page arXiv:2406.05447.

Rauer, H., Catala, C., Aerts, C., Appourchaux, T., Benz, W., Brandeker, A., Christensen-Dalsgaard, J., Deleuil, M., Gizon, L., Goupil, M. J., Güdel, M., Janot-Pacheco, E., Mas-Hesse, M., Pagano, I., Piotto, G., Pollacco, D., Santos, C., Smith, A., Suárez, J. C., Szabó, R., Udry, S., Adibekyan, V., Alibert, Y., Almenara, J. M., Amaro-Seoane, P., Eiff, M. A.-v., Asplund, M., Antonello, E., Barnes, S., Baudin, F., Belkacem, K., Bergemann, M., Bihain, G., Birch, A. C., Bonfils, X., Boisse, I., Bonomo, A. S., Borsa, F., Brandão, I. M., Brocato, E., Brun, S., Burleigh, M., Burston, R., Cabrera, J., Cassisi, S., Chaplin, W., Charpinet, S., Chiappini, C., Church, R. P., Csizmadia, S., Cunha, M., Damasso, M., Davies, M. B., Deeg, H. J., Díaz, R. F.,

Dreizler, S., Dreyer, C., Eggenberger, P., Ehrenreich, D., Eig Müller, P., Erikson, A., Farmer, R., Feltzing, S., de Oliveira Fialho, F., Figueira, P., Forveille, T., Fridlund, M., García, R. A., Giommi, P., Giuffrida, G., Godolt, M., Gomes da Silva, J., Granzer, T., Grenfell, J. L., Grottsch-Noels, A., Günther, E., Haswell, C. A., Hatzes, A. P., Hébrard, G., Hekker, S., Helled, R., Heng, K., Jenkins, J. M., Johansen, A., Khodachenko, M. L., Kislyakova, K. G., Kley, W., Kolb, U., Krivova, N., Kupka, F., Lammer, H., Lanza, A. F., Lebreton, Y., Magrin, D., Marcos-Arenal, P., Marrese, P. M., Marques, J. P., Martins, J., Mathis, S., Mathur, S., Messina, S., Miglio, A., Montalban, J., Montalto, M., Monteiro, M. J. P. F. G., Moradi, H., Moravveji, E., Mordasini, C., Morel, T., Mortier, A., Nascimbeni, V., Nelson, R. P., Nielsen, M. B., Noack, L., Norton, A. J., Ofir, A., Oshagh, M., Ouazzani, R. M., Pápics, P., Parro, V. C., Petit, P., Plez, B., Porette, E., Quirrenbach, A., Ragazzoni, R., Raimondo, G., Rainer, M., Reese, D. R., Redmer, R., Reffert, S., Rojas-Ayala, B., Roxburgh, I. W., Salmon, S., Santerne, A., Schneider, J., Schou, J., Schuh, S., Schunker, H., Silva-Valio, A., Silvotti, R., Skillen, I., Snellen, I., Sohl, F., Sousa, S. G., Sozzetti, A., Stello, D., Strassmeier, K. G., Švanda, M., Szabó, G. M., Tkachenko, A., Valencia, D., Van Grootel, V., Vauclair, S. D., Ventura, P., Wagner, F. W., Walton, N. A., Weingrill, J., Werner, S. C., Wheatley, P. J., and Zwintz, K. (2014). The PLATO 2.0 mission. *Experimental Astronomy*, 38(1-2):249–330.

Rauer, H. and Heras, A. M. (2018). Space Missions for Exoplanet Science: PLATO. In Deeg, H. J. and Belmonte, J. A., editors, *Handbook of Exoplanets*, page 86.

Team-FreeAstro (2024a). Siril - documentation. <https://siril.readthedocs.io/en/stable/>.

Team-FreeAstro (2024b). Siril - image processing tool for astronomy and other. <https://siril.org/>.

UofL (2021). Astroimagej, imagej for astronomy. <https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/>.

Zacharias, N., Monet, D. G., Levine, S. E., Urban, S. E., Gaume, R., and Wycoff, G. L. (2004). The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD). In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 205 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 48.15.

A. Anexo

En este anexo, se utilizó la fotometría instrumental obtenida por los paquetes de softwares evaluados, para generar las curvas de brillo del target y de las CEB con un método uniforme. Este análisis fue realizado por parte del supervisor de esta investigación con el paquete de fotometría VANALIZ (Deeg, 2013). No se incluye SIPS, pues su fichero de exportación no incluye datos suficientes para la realización del análisis.

En este programa, los primeros dos paneles indican la curva de luz del target, el primero con una escala fija y el segundo con una escala optimizada. El brillo de todas las estrellas (menos el target, y aquellas con un $weight=0$) se suma para formar una estrella sintética de comparación (su brillo esta dado en el panel *refmags sum*). Este método permite también identificar las estrellas que exhiben más ruido, como es de esperar por su brillo, e identificar y suprimir imágenes en las cuales hay un particular incremento de ruido (por defecto, mayor a 3 veces el ruido normal; las imágenes o puntos de datos suprimidos se señalan con cuadrados). El panel *residual sum* exhibe la suma de las desviaciones del brillo del promedio de todas las estrellas, mientras que los paneles de las estrellas individuales exhiben la desviación del brillo de esta estrella en una imagen dada, relativa al promedio de su brillo en todas las imágenes obtenidas. Además, hay un número de paneles variables con información auxiliar, según la información proporcionada por los programas.

Gracias a este análisis uniforme, se puede obtener información acerca de la precisión fotométrica de cada uno de los programas. Esta información aparece en la Tabla 2:

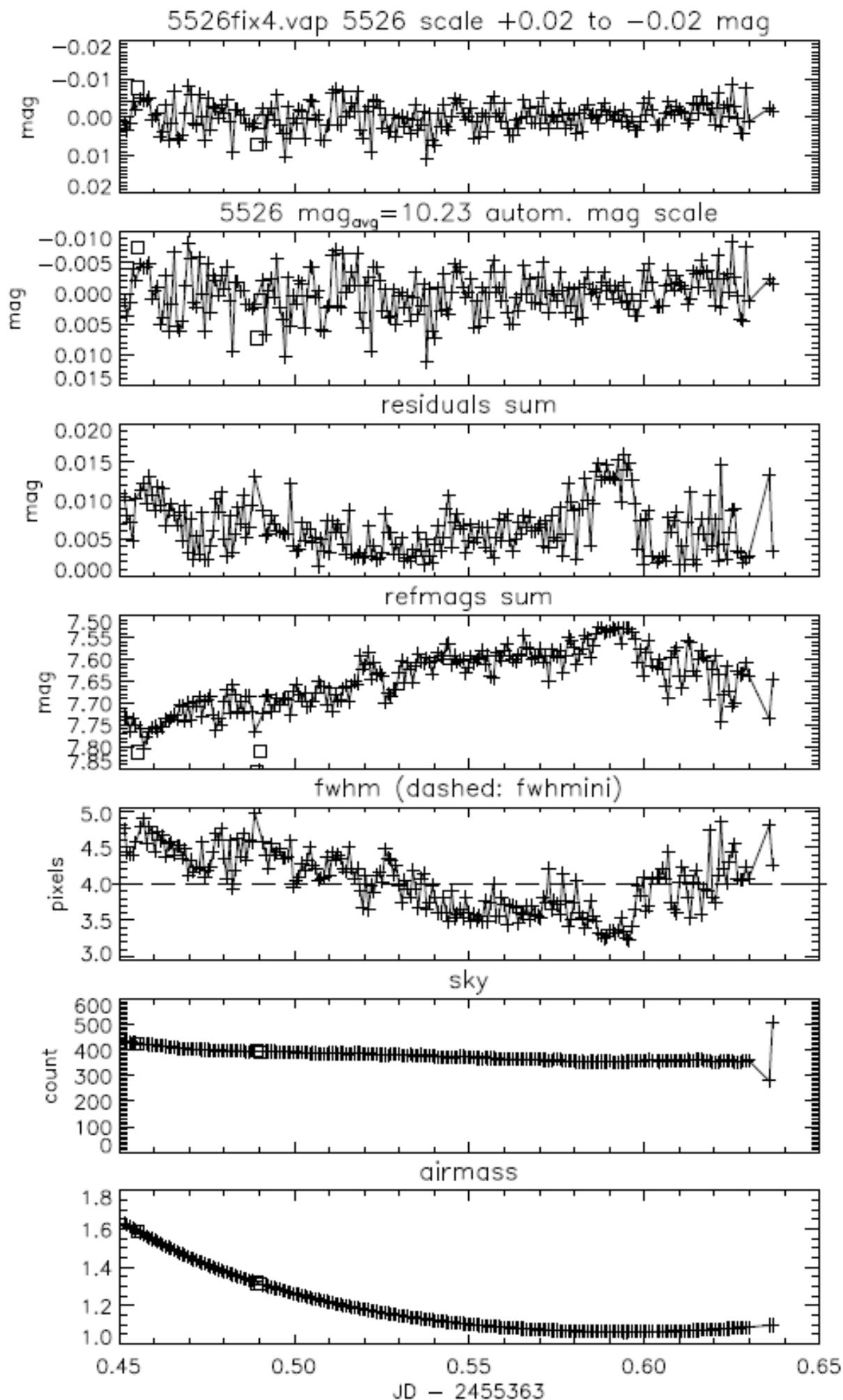
Tabla 2: Precisión fotométrica de cada paquete. Siendo RMS la desviación estándar de la curva de luz del target, incluyendo solo puntos válidos, con su número dado en $Npts$, y $Nref$ es el número de estrellas de referencia empleadas

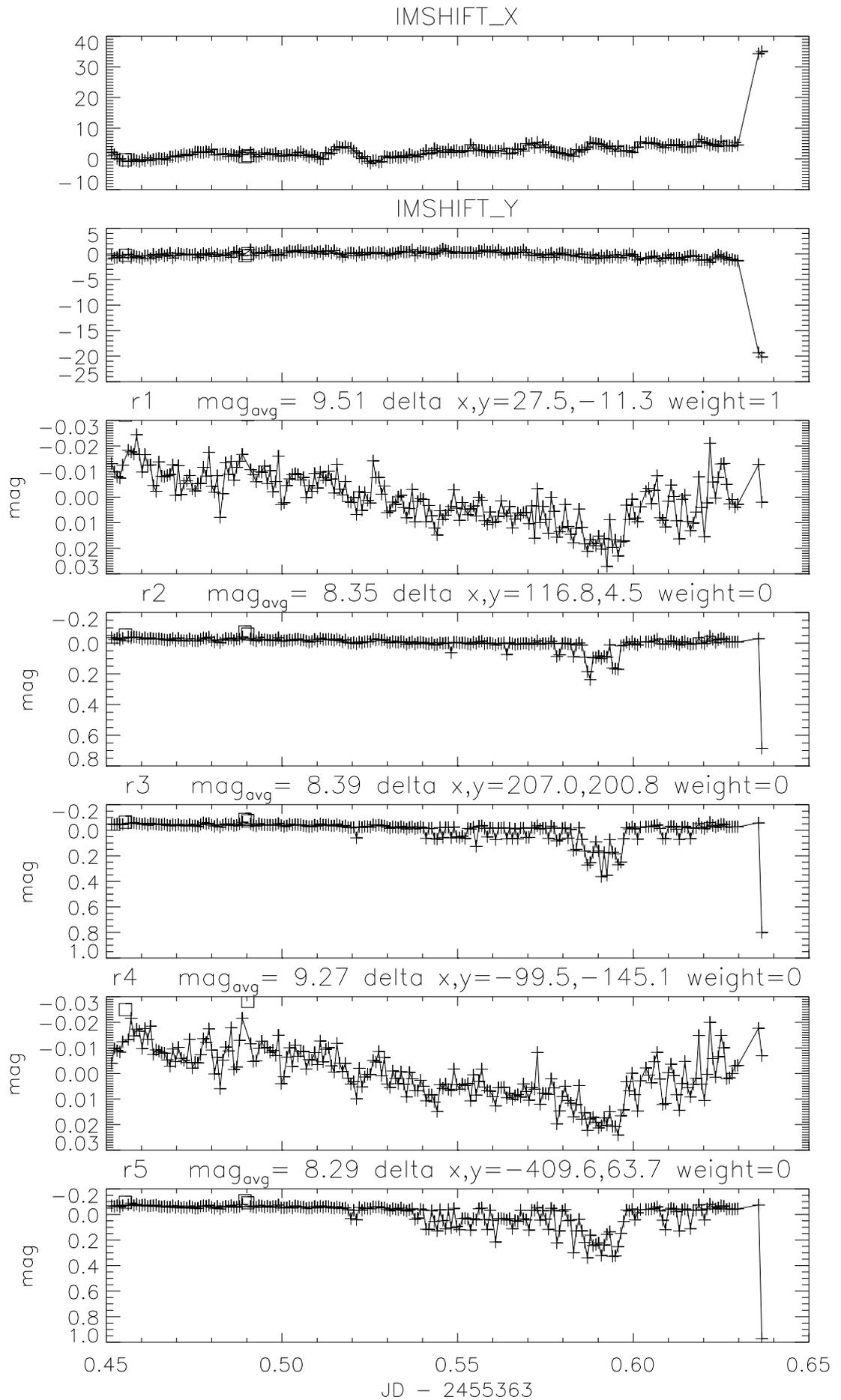
Paquete	RMS	Npts	Nref
Vaphot	0.00354258	227	13
AstroImageJ	0.00272260	225	11
Siril	0.00362250	225	7
C-Munipack	0.00364860	224	7

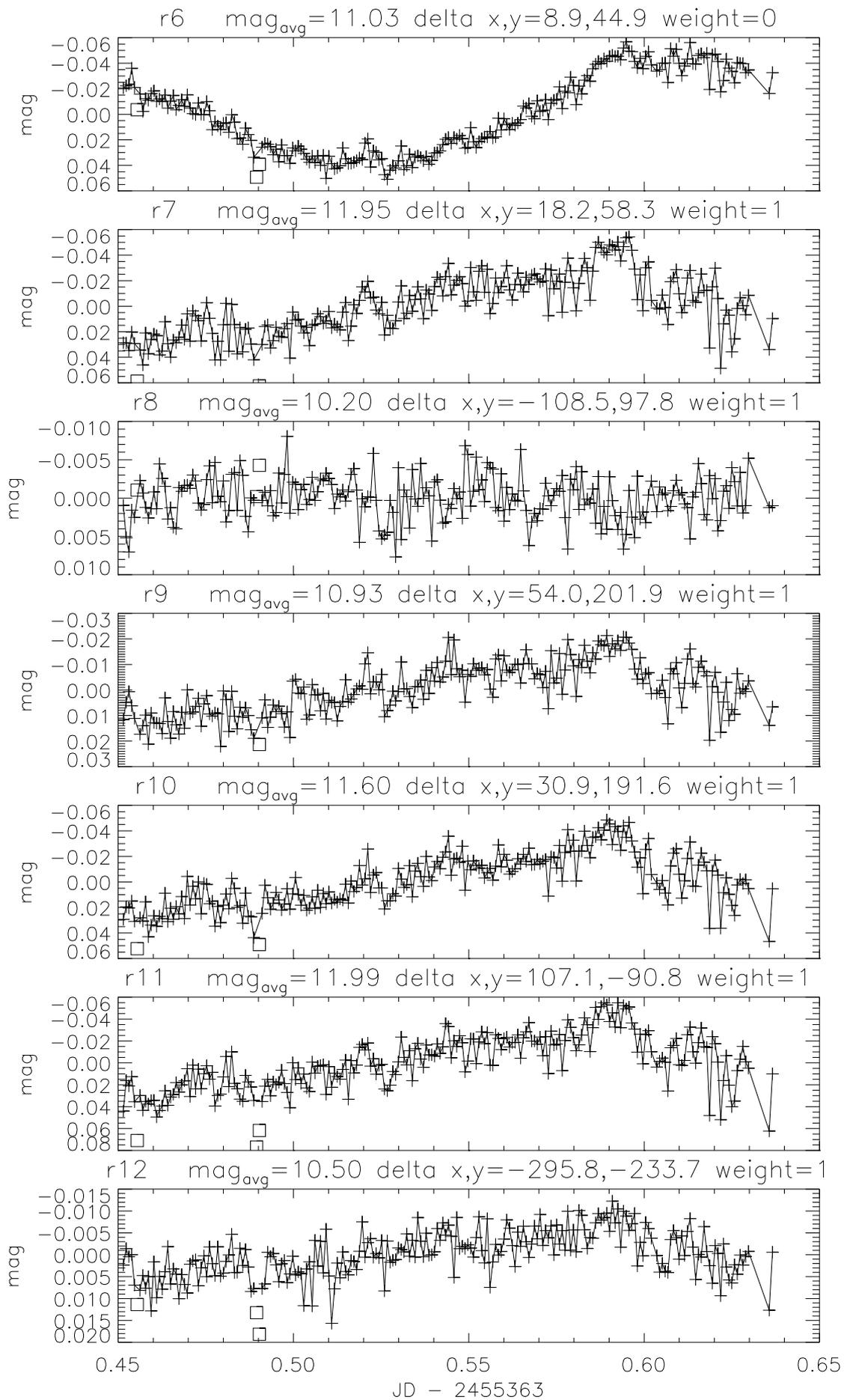
En esta tabla se puede interpretar un valor de $RMS=0.0036$ como un promedio de 0.36% en la precisión de la medición del flujo relativo. La tabla incluye también el paquete Vaphot que no ha sido parte de la comparación.

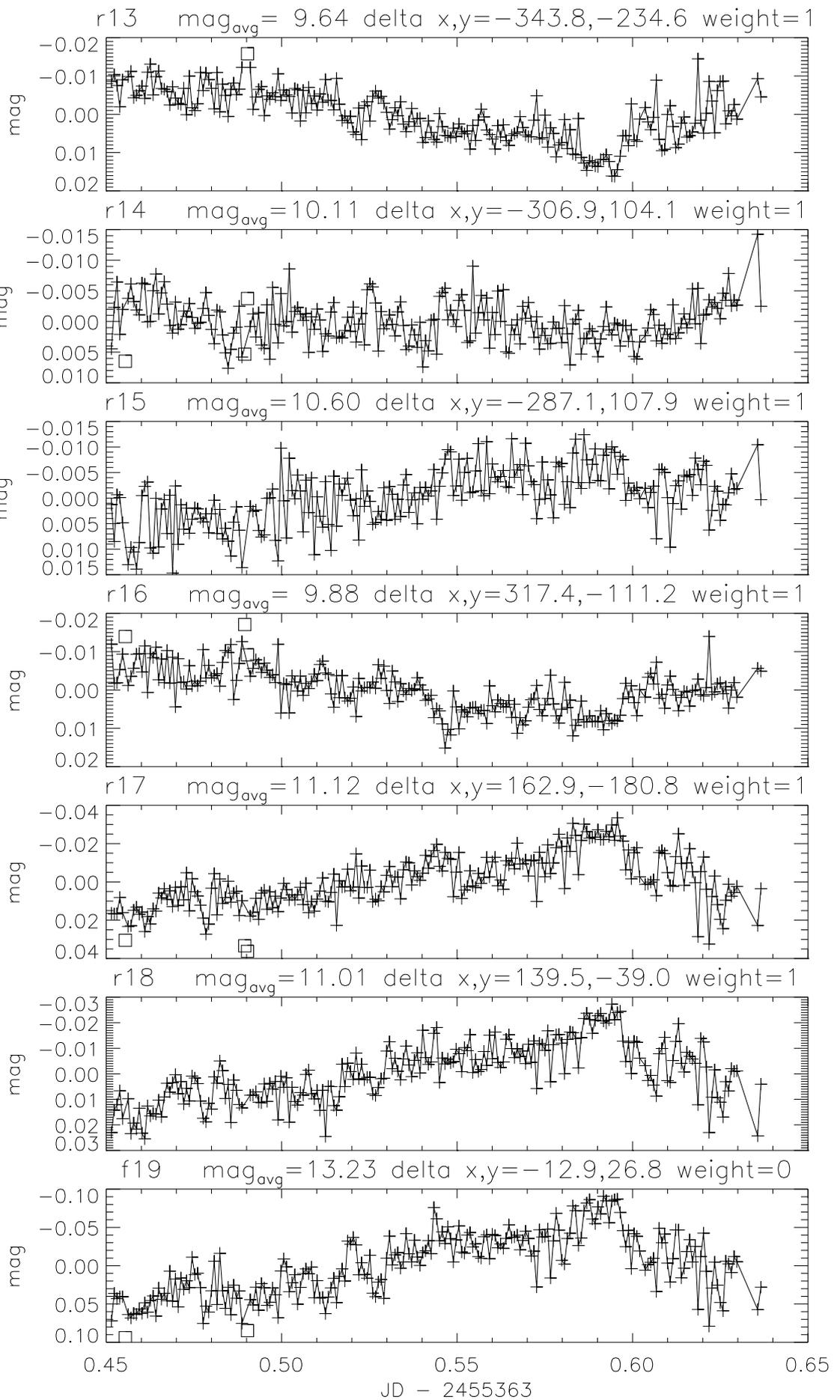
Con este segundo análisis AIJ vuelve a destacar como el paquete de software más preciso y recomendable de los estudiados. Sin embargo, las diferencias en el RMS pueden deberse a pequeños matices en la selección de las aperturas; y por ello, no hay diferencias significativas en este aspecto entre los programas.

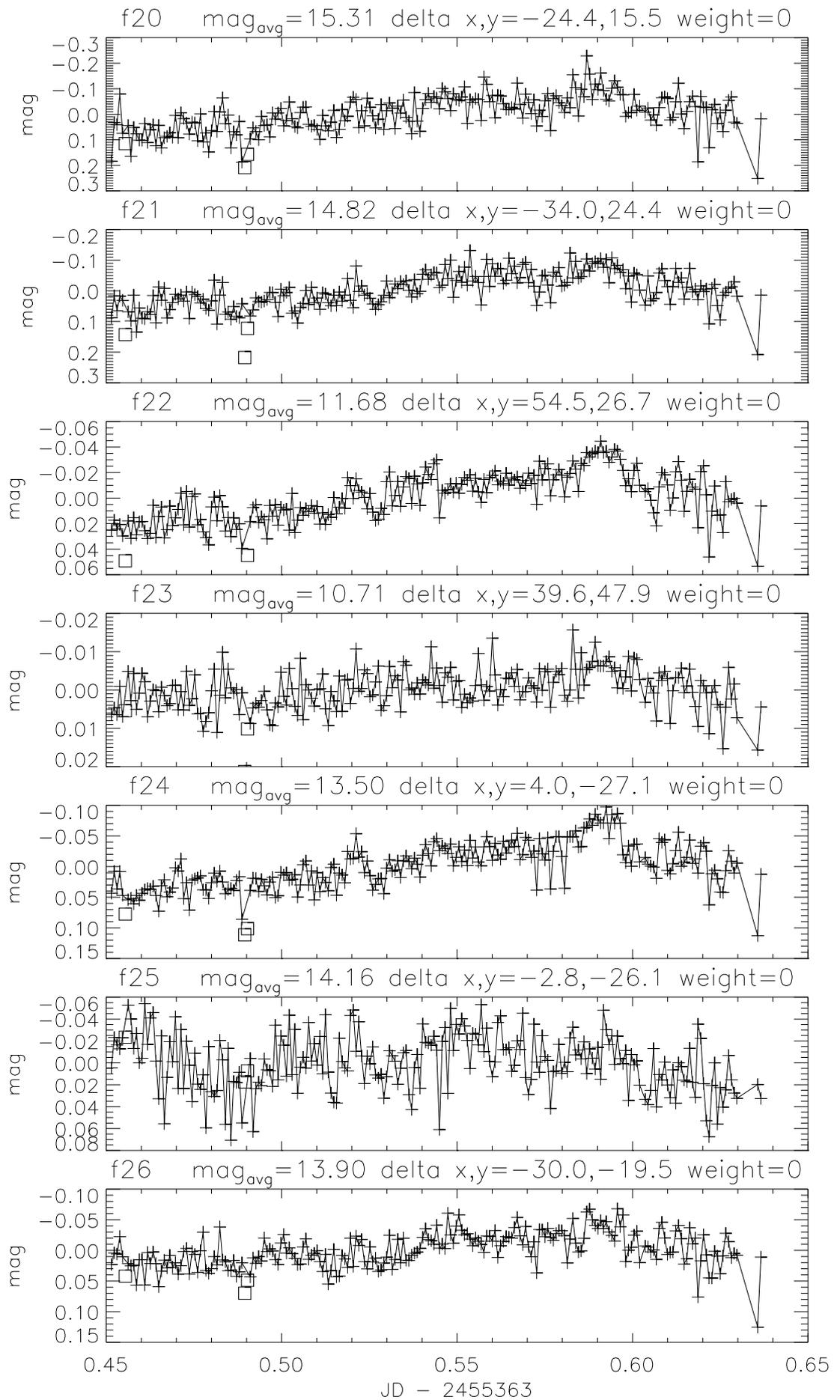
Vaphot

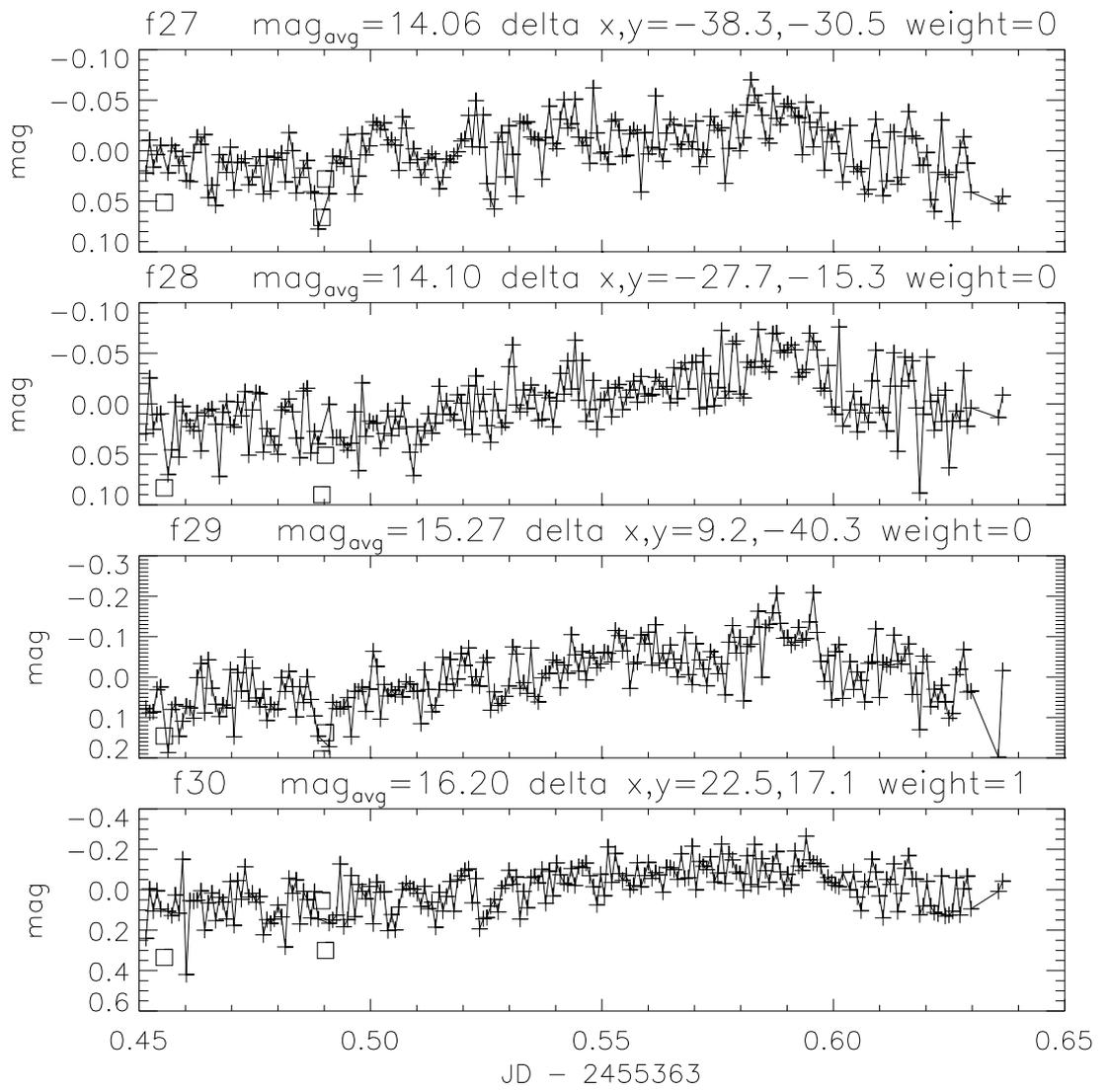




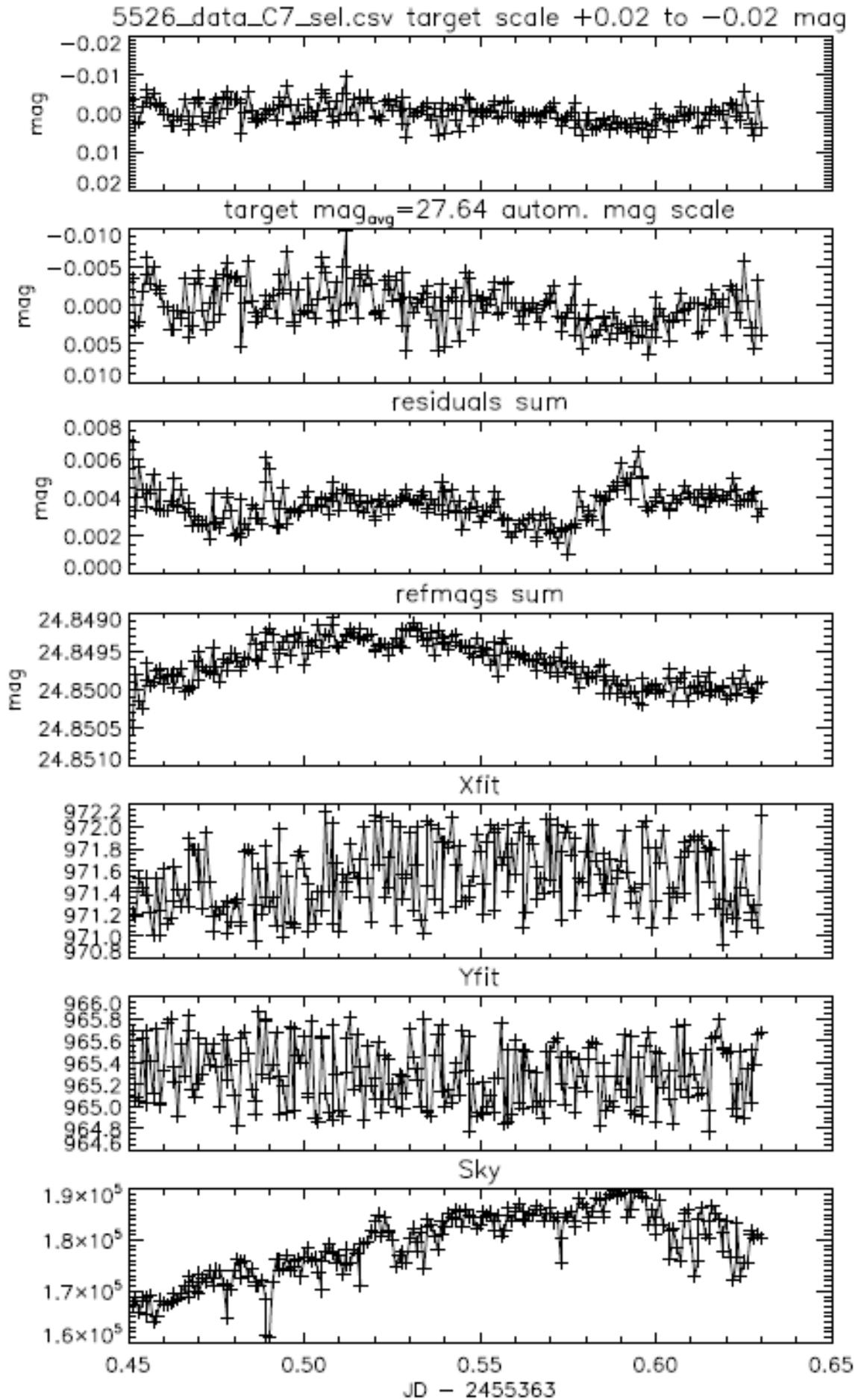




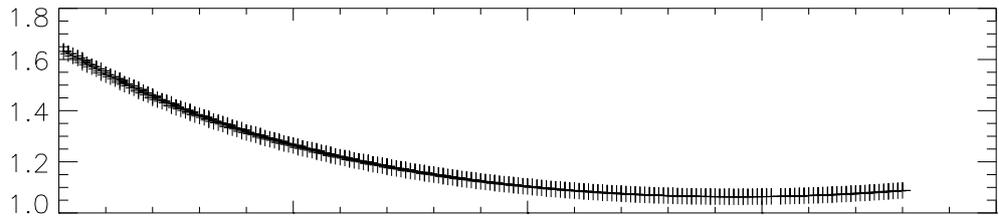




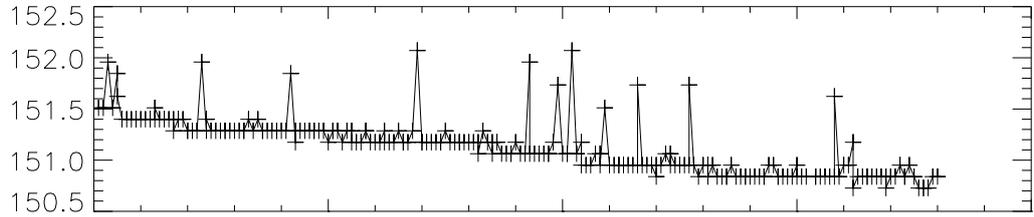
AstroImageJ



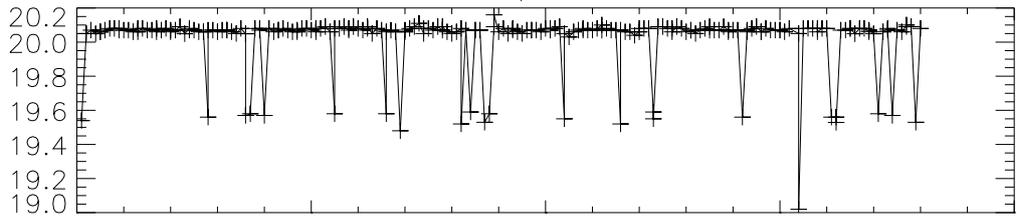
Airmass



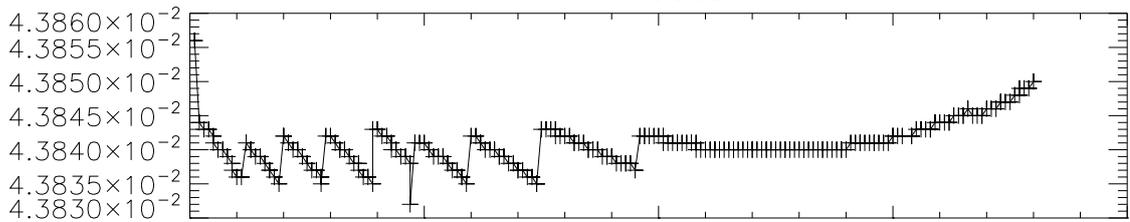
CCDTemp



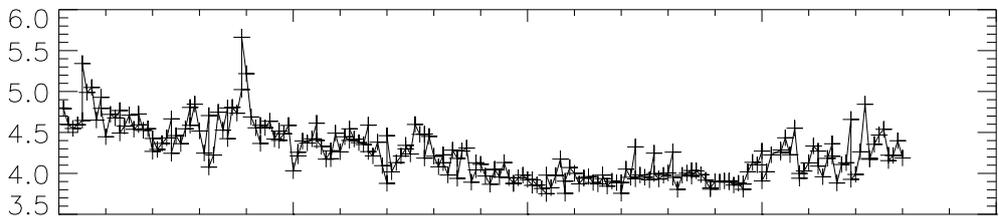
Exptime



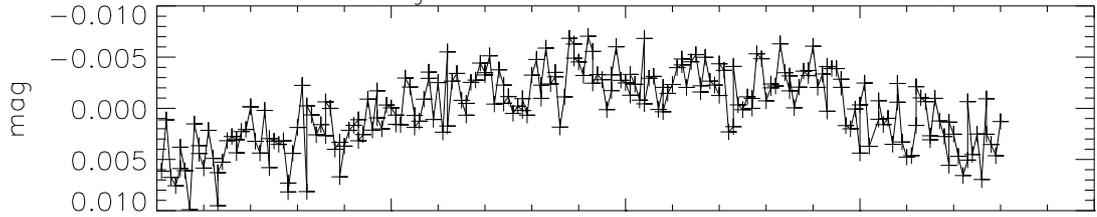
Telfocus



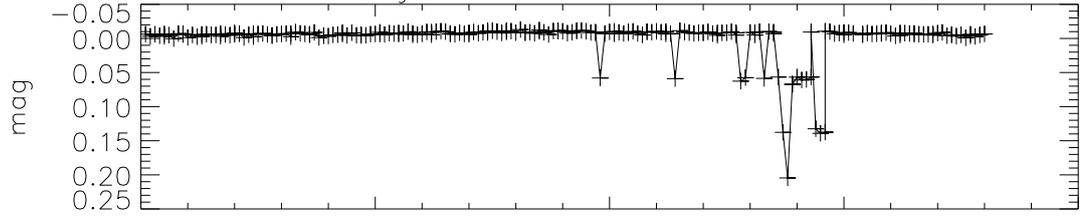
FWHM



R1 mag_{avg}=26.72 delta x,y=1.0,1.0 weight=1



R2 mag_{avg}=25.82 delta x,y=2.0,2.0 weight=0



0.45

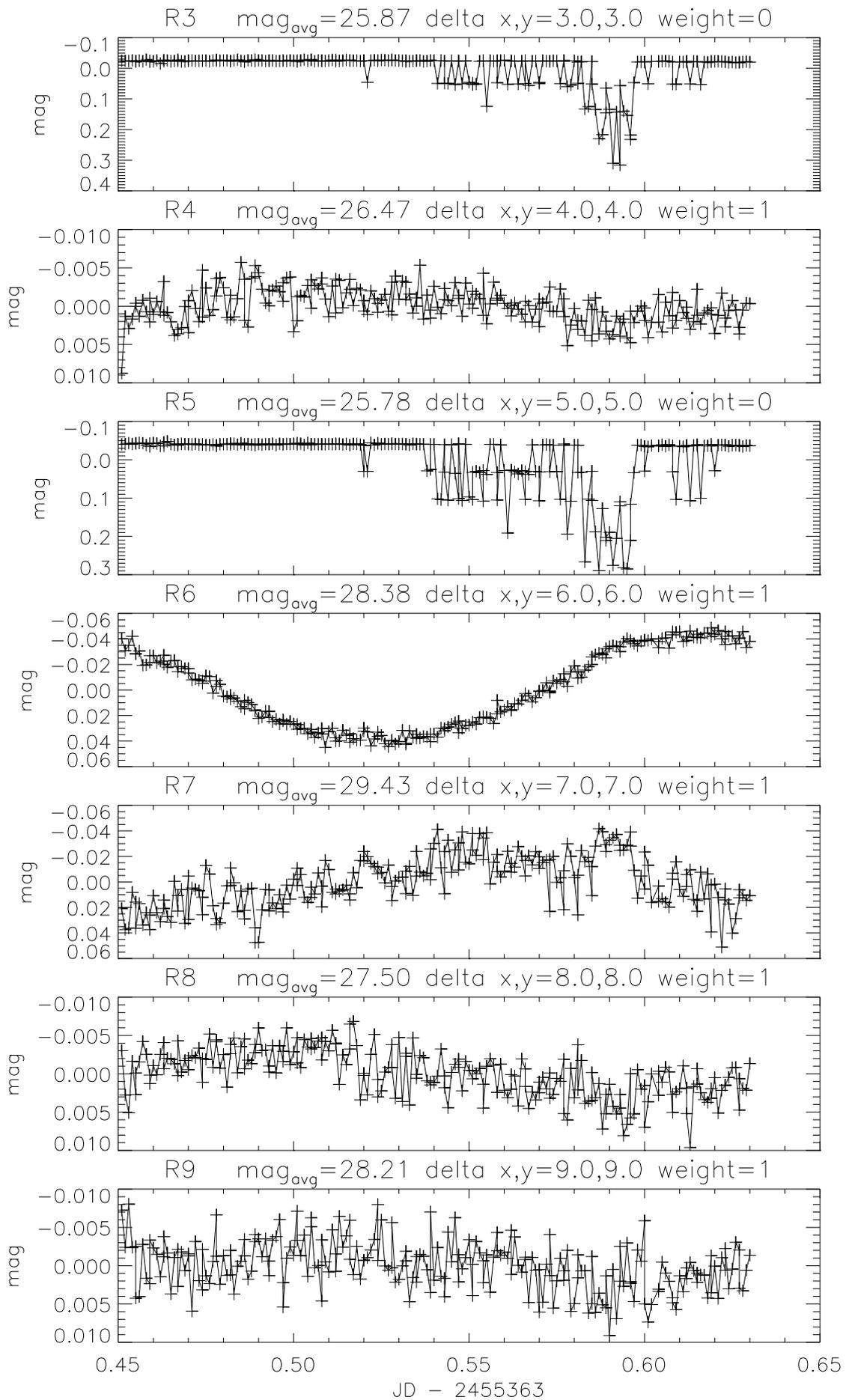
0.50

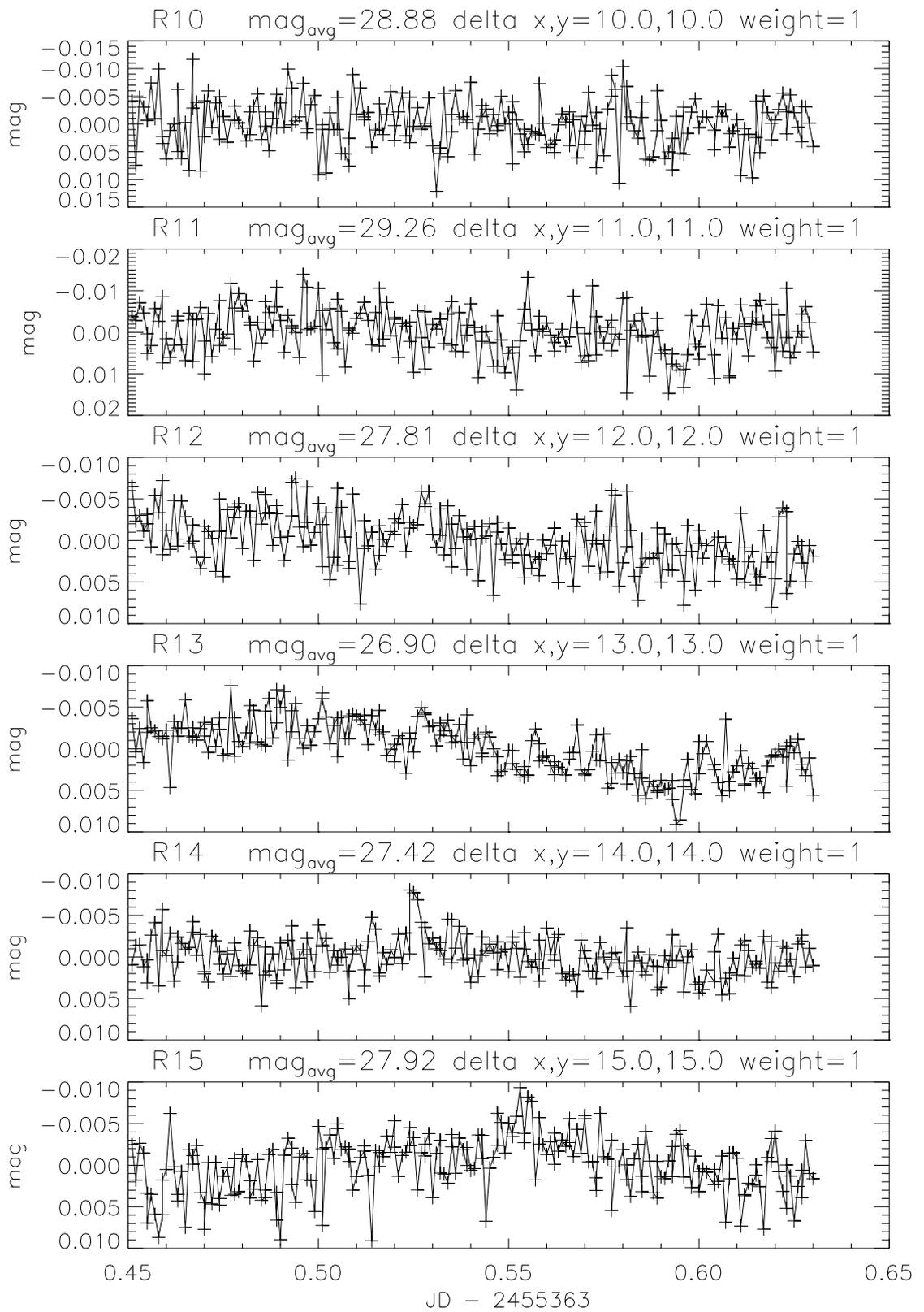
0.55

0.60

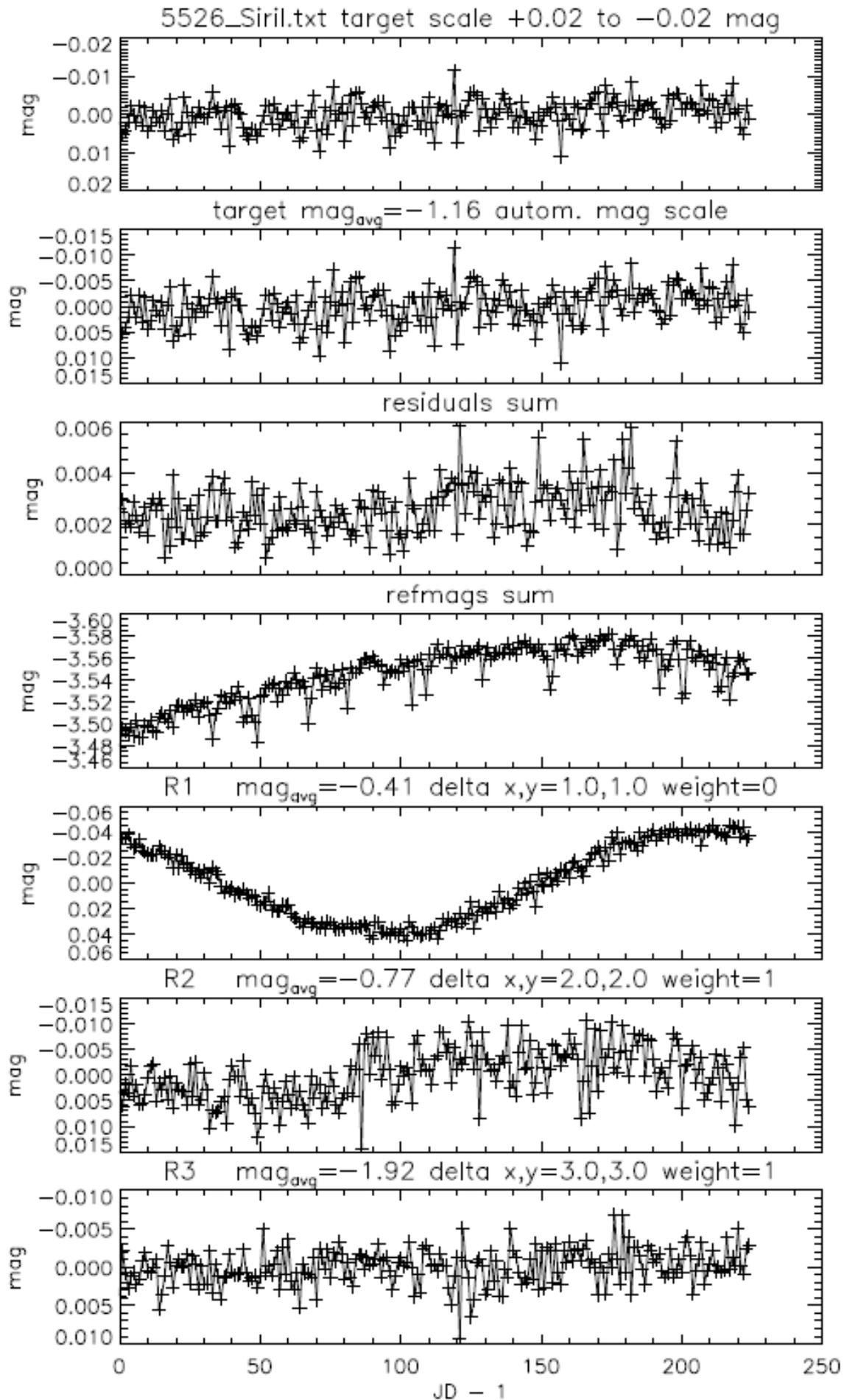
0.65

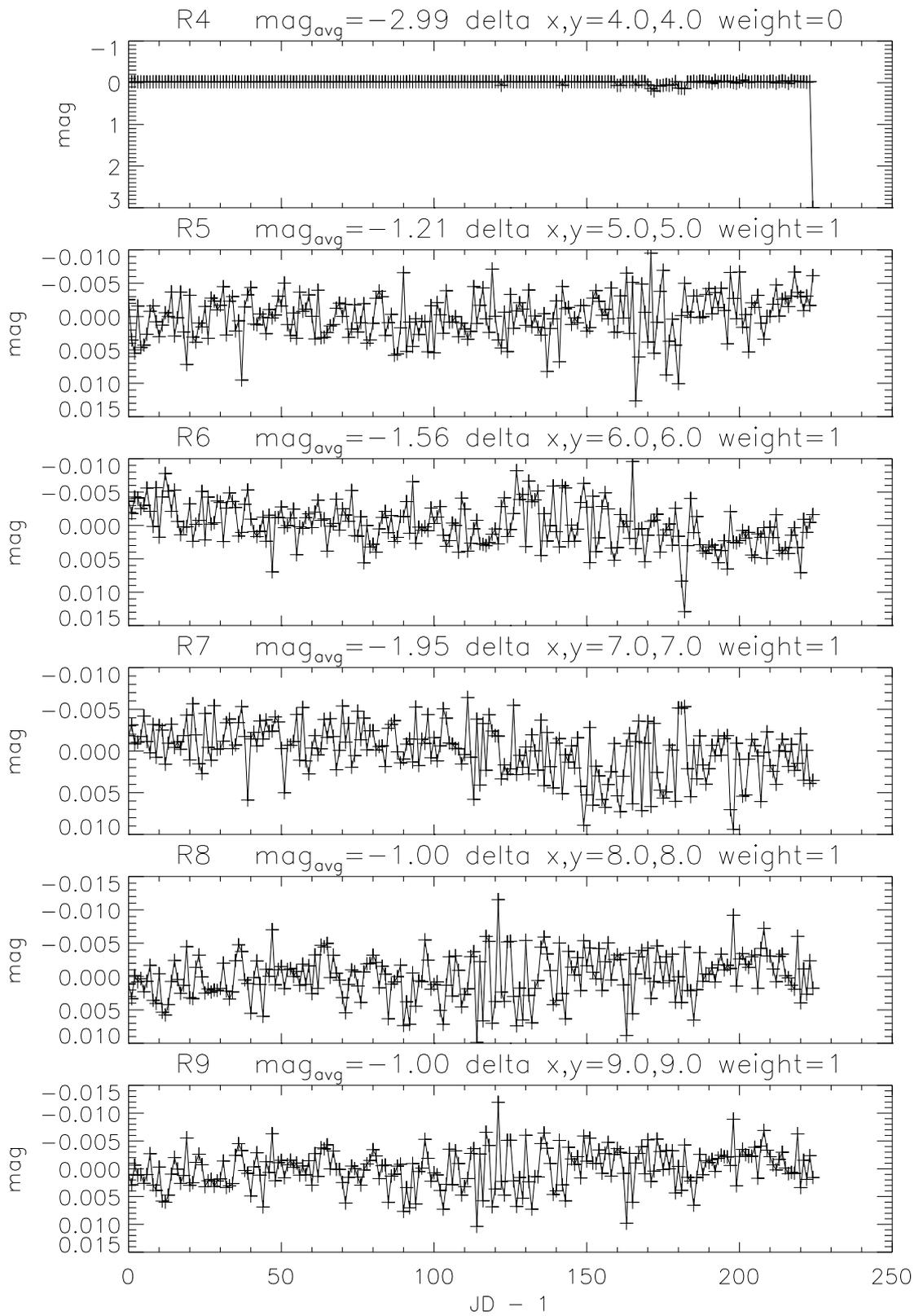
JD - 2455363





Siril





C Munipack

