

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Máster en Astrofísica



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Planetas errantes y gigantes en las Pléyades
Free-floating, giant planets in the Pleiades

Amanda López Ayuso

Supervisado por:

Dra. María Rosa Zapatero Osorio (CAB, CSIC-INTA)

Dra. MariCruz Gálvez Ortiz (CAB, CSIC-INTA)

Curso académico 2024-25

Calificación 9.0

Resumen:

En este trabajo se realiza un estudio fotométrico y astrométrico profundo en la banda J mediante el empleo de observaciones realizadas en el cúmulo de las Pléyades en las noches transcurridas desde el 9 hasta el 15 de noviembre de 2017 con el instrumento Omega2000, situado en el telescopio 3.5 m de Calar Alto. Para ello se emplea la herramienta IRAF, además de observaciones realizadas en otra época anterior con una diferencia de alrededor de 10 años entre ambas, con el fin obtener los valores del movimiento propio. Los límites de la fotometría se sitúan en $J \approx 23$ -24 mag, alcanzando una profundidad superior a los anteriores estudios similares.

Esto nos permite lograr los objetivos del proyecto, basados en la confirmación de las propiedades observadas para los candidatos a miembros del cúmulo, que presentaban movimientos propios compatibles con los del cúmulo y colores acordes a la secuencia conocida de las Pléyades, identificados en trabajos anteriores, y la ampliación del número de dichos candidatos. De esta manera, el trabajo aquí presentado contribuye a la confirmación de planetas errantes previamente conocidos en las Pléyades y al incremento de esta población que requerirá estudios posteriores para su caracterización.

Se obtienen así resultados prometedores, siendo estos compatibles con los presentados en literatura ([Zapatero Osorio et al. 2014](#)). Los valores de magnitudes en la banda J conseguidos para los objetos de interés especial (Calar Pleiades) se encuentran alrededor de 20-21 mag, mientras que los calculados para el movimiento propio, aun compatibles, se alejan ligeramente del valor medio que presentan las Pléyades ([19.997, -45.548] mas/yr). Los nuevos candidatos identificados por astrometría tienen magnitudes J en el intervalo 15.5-21 mag.

Abstract:

In this work, a deep photometric and astrometric study in the J band is carried out using observations taken with the Omega2000 instrument, located on the 3.5 m Calar Alto telescope, during the nights from November 9 to 15, 2017, in the Pleiades cluster. For this purpose, the IRAF tool is used, along with earlier observations taken approximately 10 years apart to derive proper motion values. The photometric limits are around $J \approx 23$ -24 mag, reaching a greater depth than previous similar studies.

This allows us to meet the project's objectives, which are based on confirming the observed properties of cluster member candidates and expanding the number of such candidates. These already existing candidates exhibited proper motions consistent with those of the cluster and colors matching the known Pleiades sequence, having been identified in previous works. In this way, the work presented here contributes to the confirmation of previously known free-floating planets in the Pleiades and to the increase of this population, which will require further studies for its characterization.

Promising results are obtained, which are consistent with those reported in the literature ([Zapatero Osorio et al. 2014](#)). The J -band magnitudes obtained for the specially interesting objects (Calar Pleiades) are around 20-21 mag, while the proper motion values, although still compatible, slightly deviate from the mean motion of the Pleiades ([19.997, -45.548] mas/yr). The new candidates identified through astrometry have J -band magnitudes in the range 15.5-21 mag.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Planetas errantes en las Pléyades	1
1.2. Fotometría y astrometría empleando la herramienta IRAF	1
1.3. Objetivos del TFM	2
2. Observaciones	3
2.1. Omega2000	3
3. Análisis de los datos	3
3.1. Reducción de imágenes	6
3.1.1. Corriente de oscuridad	6
3.1.2. Imágenes <i>flat</i>	7
3.1.3. Alineación y combinación final	9
3.2. Fotometría	9
3.2.1. Fotometría de apertura	12
3.2.2. Fotometría PSF	12
3.3. Astrometría	15
4. Discusión de resultados y conclusiones	20

1. Introducción

Actualmente, uno de los objetivos de la astrofísica moderna reside en conseguir entender la evolución y las propiedades de objetos subestelares. Para alcanzarlo, es necesario identificar y estudiar objetos de este tipo en distintos rangos de edades, de manera que se pueda completar la secuencia de evolución, observando las características, diferencias y similitudes.

Dentro de este marco, se han estudiado diferentes regiones de formación estelar y cúmulos de estrellas de edades jóvenes obteniendo resultados prometedores de enanas de tipos L (e.g., [Delfosse et al. 1997](#); [Tinney & Reid 1998](#); [Strauss et al. 1999](#); [Kirkpatrick et al. 2000](#); [Kirkpatrick et al. 2011](#); [Kirkpatrick et al. 2013](#); [Delorme et al. 2010](#); [Cushing et al. 2011](#); [Burningham et al. 2013](#)). Estas enanas evolucionan disminuyendo su luminosidad y temperatura, convirtiéndose en enanas con tipos espectrales T e Y a la edad del sistema solar. En este trabajo, se pretende ampliar ese conocimiento, identificando fuentes en las Pléyades con magnitudes menores a las alcanzadas anteriormente para confirmar y mejorar resultados obtenidos con anterioridad.

1.1. Planetas errantes en las Pléyades

Los planetas errantes, también conocidos como flotantes o aislados, son objetos de masa planetaria que no están ligados gravitacionalmente a ninguna estrella. Su existencia se ha confirmado en muchas regiones de formación estelar, pero se desconoce aún su origen. La duda reside en si son planetas expulsados de sistemas planetarios jóvenes o, por el contrario, se formaron aislados como estrellas de muy baja masa ([Luhman 2012](#); [Lucas & Roche 2000](#)). Además, se ha confirmado también la existencia de planetas aislados en la vecindad solar, es decir, con edades probables superiores a 1 Gyr.

Por otro lado, las Pléyades (también conocidas como "Las siete hermanas") son un cúmulo estelar abierto y joven con una edad aproximada de 120 millones de años. Se encuentra a una distancia de 133.5 parsecs ([Soderblom et al. 2005](#)) y constituye un entorno ideal para poder estudiar este tipo de objetos, debido a su cercanía al Sol y a que su juventud garantiza que la mayoría de los planetas errantes aún retengan el suficiente calor interno para detectarse en el infrarrojo cercano (NIR: *Near InfraRed*). Además, el elevado movimiento propio que tiene ([Alfonso & García-Varela 2023](#)), muy bien caracterizado, facilita la identificación de todos los miembros genuinos.

[Zapatero Osorio et al. 2014](#) realizó un estudio profundo en las bandas J y H en un área de 0.8 deg^2 en las Pléyades, detectando así una secuencia fotométrica clara de objetos subestelares con masas más pequeñas que la masa mínima para quemar deuterio en el núcleo ($\approx 13 M_{Jup}$), o sea, candidatos a planetas errantes ([Saumon et al. 1996](#)). Estos hallazgos se suman a ciertos estudios sobre la alta frecuencia de planetas errantes que sugieren que podría haber hasta dos por cada estrella en la galaxia ([Sumi et al. 2011](#)).

Con todo ello, es fácil visualizar el potencial que presentan los estudios centrados en el cúmulo joven denominado Pléyades en busca de planetas errantes. Por esta razón, se realiza el actual trabajo.

1.2. Fotometría y astrometría empleando la herramienta IRAF

La identificación y caracterización de objetos subestelares en cúmulos estelares precisa del uso de técnicas observacionales avanzadas, entre las que se encuentran la fotometría profunda en el infrarrojo cercano y el análisis astrométrico. El programa IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*, [Tody 1986](#)), consistente en una gran colección de *software* escrito por astrónomos y programadores y

mantenida por el Observatorio Nacional de Astronomía Óptica (NOAO) en Estados Unidos, ha constituido desde la década de 1980 una de las herramientas más empleadas en la astronomía óptica e infrarroja para reducir y analizar imágenes.

La astrometría, por un lado, consiste en la determinación precisa de las posiciones y movimientos de los objetos celestes. En el trabajo de [Zapatero Osorio et al. 2014](#) se aplicaron métodos astrométricos comparando imágenes obtenidas con nueve años de diferencia en los filtros J y H. Las coordenadas de los objetos fueron calibradas utilizando catálogos como UKIDSS y 2MASS, alcanzando precisiones de ± 6 mas/año. Esta técnica permite distinguir miembros del cúmulo de objetos de fondo mediante su movimiento propio, que en el caso de las Pléyades es de aproximadamente (19.71, -44.82) mas/año ([Lotkin & Beshenov 2003](#)).

La fotometría, por su parte, fue realizada empleando métodos como la fotometría de apertura, consistente en la suma de la luz dentro de una región circular centrada en el objeto, restando el brillo del cielo circundante. Además, se emplea el ajuste de la función de dispersión puntual (PSF del inglés *Point Spread Function*), que utiliza la respuesta del sistema a una fuente puntual para comprender y mejorar la calidad de la imagen, y que resulta fundamental para obtener magnitudes precisas en regiones con alta densidad estelar o con objetos de bajo brillo superficial

La implementación de estos métodos en el presente TFM permitirá reducir datos de archivo, y aplicar una estrategia de selección robusta para detectar y/o confirmar nuevos candidatos a planetas errantes.

1.3. Objetivos del TFM

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es la búsqueda y caracterización de objetos de masa planetaria no ligados gravitacionalmente a estrellas —planetas errantes— en el cúmulo estelar de las Pléyades. Para ello, se emplearán técnicas fotométricas y astrométricas con el software IRAF, utilizando datos en el infrarrojo cercano correspondientes a 6 noches diferentes comprendidas entre el 9 de noviembre y el 15 de noviembre del año 2017, y aplicando criterios de selección validados por la literatura científica.

Entre los objetivos específicos se incluyen:

- Reducir imágenes astronómicas en la banda J para dicho período de tiempo.
- Calibrar astrométricamente las imágenes con catálogos de referencia y calcular movimientos propios.
- Determinar magnitudes fotométricas precisas.
- Identificar objetos que cumplan criterios de movimiento propio y color compatibles con la secuencia subestelar de las Pléyades.

Este trabajo busca, además de confirmar los datos publicados en literatura, aportar nuevos resultados al campo emergente de los objetos subestelares aislados, reforzando la importancia de los cúmulos estelares como laboratorios naturales para el estudio de planetas flotantes.

2. Observaciones

2.1. Omega2000

El presente trabajo se realiza con observaciones tomadas con el instrumento Omega2000, una cámara operativa instalada en el anillo frontal del telescopio de 3.5 metros del Observatorio de Calar Alto y diseñada para la toma de datos en el rango del infrarrojo cercano, que cubre desde la banda z hasta la banda K.

La instrumentación se encuentra en el foco primario del telescopio, y su diseño estructural rígido minimiza las deformaciones mecánicas, garantizando una alta estabilidad durante la adquisición de datos. La óptica de Omega2000 incluye un corrector de campo que reduce el número f hasta $f/2.35$, lo que permite obtener imágenes con una distorsión muy baja —inferior a un píxel desde el centro hasta los extremos del campo— y una función de dispersión puntual (PSF) estable. Estas características lo hacen especialmente adecuado para estudios astrométricos de alta precisión, como la determinación de paralajes de enanas marrones cercanas o, como es nuestro caso, la medida del movimiento propio de objetos subestelares observados en las Pléyades. Además, gracias al diseño optimizado de su criostato (*dewar*^[1]) y al sistema de apantallamiento térmico, el instrumento puede llevar a cabo observaciones con un fondo térmico reducido en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 0.85 y 2.5 μm .

El detector empleado es un HAWAII-2 de HgCdTe, con el que se alcanza un campo de visión de 15.5×15.4 minutos de arco. La combinación de un campo relativamente amplio y una óptica de alta eficiencia convierte a Omega2000 en un instrumento muy útil para cartografiados profundos, como los realizados en el marco del proyecto ALHAMBRA (Moles et al. 2008) en campos cosmológicos.

Se presenta un esquema de la ubicación del detector en el telescopio y del propio detector en la Figura [1].

De esta manera, se dispone de imágenes en formato fits tanto de calibración (corrientes de oscuridad, campo plano de cúpula y de cielo) como de ciencia, siendo las primeras las empleadas para corregir los defectos que presentan las imágenes debidas al detector y las últimas, una vez corregidas, las analizadas para obtener resultados científicos. En este caso, las imágenes corresponden a las 6 noches transcurridas entre el 9 de noviembre y el 15 de noviembre de 2017.

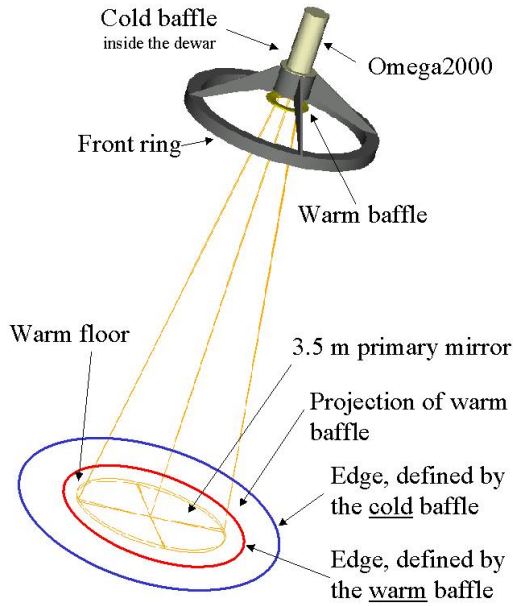
3. Análisis de los datos

En primer lugar, mencionar la existencia de unas 1800 imágenes de ciencia con las que se trabaja en este TFM, 150 imágenes individuales por cada apuntado, siendo estos un total de doce. Estos campos se muestran en la Tabla [1] con sus características principales. Cabe mencionar que teóricamente existe un campo más en las observaciones, el campo 5_4 en la noche del 9 de noviembre, que no se trata debido a que los datos crudos correspondientes al apuntado de dicho campo parecen estar corruptos. Por otro lado, el campo 3_2, perteneciente en parte a la noche del 14 de noviembre, está incompleto, debido de nuevo a datos crudos corruptos dicha noche. Además, en la Figura [2] se puede observar la posición central y el área cubierta por los apuntados^[2].

¹Un criostato es un dispositivo que permite mantener objetos a temperaturas criogénicas (muy bajas), mientras que un Dewar es un tipo específico de criostato que utiliza líquidos criogénicos (como nitrógeno líquido o helio líquido) para enfriar y transportar objetos.

²Inicialmente el área cubierta por todos ellos es la misma y corresponde a la del detector, aproximadamente $15' \times 15'$. Sin embargo, cada campo se recorta (*trim*) según su necesidad al reducir, evitando los defectos en la imagen final.

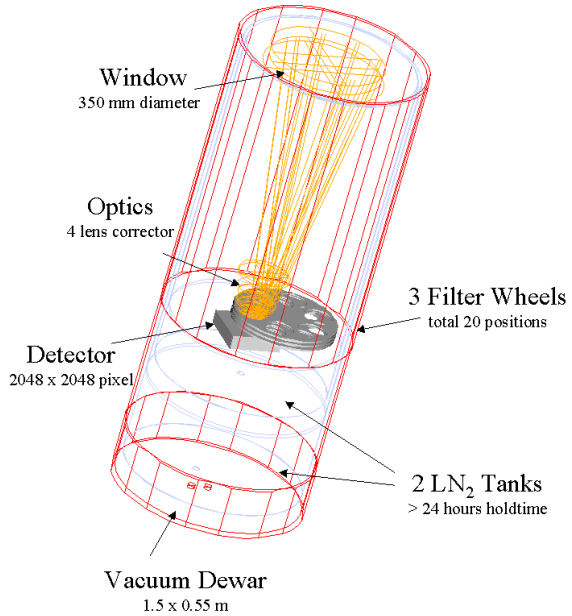
Baffling configurations



(a)

Omega 2000

Mechanical Outlines



(b)

Figura 1: (a) Esquema de la ubicación del detector en el telescopio de 3.5 m de Calar Alto. (b) Estructura básica del instrumento Omega2000. Se observa la ubicación del detector y el apantallamiento térmico.

Resulta interesante comentar las características de los campos mostradas en la Tabla [1](#).

En primer lugar, la existencia de campos que se toman entre dos noches diferentes, lo cual dificulta su análisis, en especial si las noches presentan condiciones distintas. Por otro lado, dichas condiciones se cuantifican parcialmente con el valor del *seeing*, calculado a partir del valor de FWHM³ (*Full Width Height Maximum*). Las noches que presentan mayor valor de este son las de peor calidad, como es el caso de la noche del 9, lo cual podría explicar la existencia de los datos crudos corruptos en uno de los campos de esa noche. Además, de forma general se observa que los campos observados en la misma noche presentan valores del *seeing* similares, aunque no idénticos ya que las condiciones pueden variar a lo largo de esta. Por último, merece la pena mencionar el alto valor obtenido para el campo 2_3, que da problemas a la hora de alinear al presentar ambas noches diferentes condiciones.

El cálculo de la FWHM se realiza con el comando *imexam* de IRAF una vez reducidos los datos, que adopta un ajuste Moffatiano al perfil radial de las fuentes puntuales.

³Se multiplica por el valor de la escala del pixel en arcsec/pix, 0.45 arcsec/pix en este caso, obtenido en la página oficial del telescopio: <https://www.caha.es/es/telescope-3-5m-2/omega-2000>

Tabla 1: Resumen de las imágenes de ciencia empleadas en el presente trabajo. El identificador se corresponde con el número empleado en la Figura 2. Los campos con más de una fecha se observaron en dos noches diferentes. La fecha se corresponde con el día en que empieza la toma de los datos, de manera que por ejemplo la fecha 11/11/2017 corresponde a la noche transcurrida entre el 11 y el 12 de noviembre. Por último, el valor de FWHM representa una media obtenida de los objetos de cada campo una vez corregidos los defectos, mientras que t_{exp} corresponde al tiempo de exposición de las imágenes proporcionadas para cada campo.

Id	Campo	Fecha	RA(J2000)	DE(J2000)C	FWHM (pix)	Seeing (arcsec)	t_{exp} (s)
1	Field1_1	13/11/2017	$3^h50^m33,9^s$	$+22^\circ55'57,9''$	2.68	1.206	150x60
2	Field1_3	13/11/2017	$3^h49^m30,6^s$	$+23^\circ09'56,4''$	2.50	1.125	150x60
3	Field1_4	12/11/2017	$3^h49^m30,0^s$	$+22^\circ55'46,3''$	3.06	1.377	150x60
4	Field2_1	11/11/2017	$3^h47^m49,6^s$	$+23^\circ26'07,5''$	2.55	1.148	150x60
5	Field2_3	10/11/2017-11/11/2017	$3^h46^m48,5^s$	$+23^\circ40'19,7''$	3.62	1.629	150x60
6	Field2_4	11/11/2017	$3^h46^m49,1^s$	$+23^\circ26'25,4''$	2.61	1.175	150x60
7	Field3_1	10/11/2017	$3^h44^m14,7^s$	$+24^\circ04'40,2''$	2.86	1.287	150x60
8	Field3_2	13/11/2017	$3^h44^m15,8^s$	$+24^\circ19'03,5''$	3.25	1.463	100x60
9	Field3_4	09/11/2017	$3^h43^m14,4^s$	$+24^\circ04'40,2''$	4.41	1.985	150x60
10	Field5_1	10/11/2017	$3^h44^m17,4^s$	$+25^\circ04'47,0''$	2.83	1.274	150x60
11	Field6_3	11/11/2017-12/11/2017	$3^h49^m09,3^s$	$+25^\circ50'04,2''$	3.04	1.368	150x60
12	Field6_4	12/11/2017	$3^h49^m09,1^s$	$+25^\circ35'53,5''$	2.52	1.134	150x60

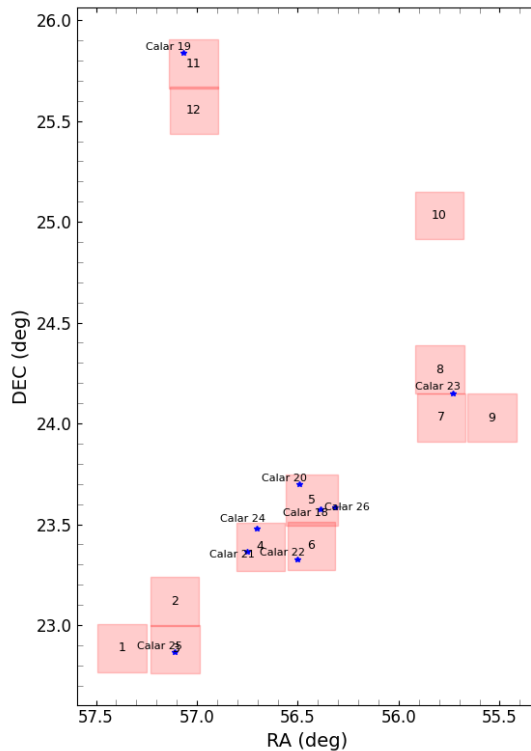


Figura 2: Gráfica que representa las posiciones y el área cubierta por cada uno de los campos estudiados en el trabajo (cuadrados rojos) y los objetos subestelares de interés (puntos azules). Los números negros corresponden al identificador para cada campo, presentado en la Tabla 1.

En referencia a la Figura 2 se menciona la existencia de varios objetos subestelares de interés, tomados del artículo [Zapatero Osorio et al. 2014](#). Sin embargo, se eligen 3 de ellos —Calar Pleiades 21, Calar Pleiades 24 y Calar Pleiades 25— para su estudio en el actual trabajo debido a la limitación de tiempo. La elección de estos objetos en concreto se debe a la mejor calidad de los campos en los que se encuentran una vez estos se han reducido. El diagrama se emplea para situar los objetos escogidos en los campos y poder proceder a su análisis.

3.1. Reducción de imágenes

Como se comenta en la Sección 2.1 los datos de ciencia obtenidos con Omega2000 son imágenes crudas, es decir, precisan de reducción previa a su estudio. Para ello, se emplean las imágenes de calibración proporcionadas.

Dichas imágenes se toman cada noche, de manera que para todas las imágenes se emplean las calibraciones correspondientes a su noche de observación⁴.

Hay que tener en cuenta que las imágenes de calibración se toman para diferentes filtros (H, K, J). Hay que utilizar para la reducción las correspondientes al filtro empleado en la obtención de imágenes de ciencia. En el caso de este trabajo la banda empleada es la que corresponde al filtro J .

3.1.1. Corriente de oscuridad

En primer lugar, se estudia la corriente de oscuridad con las imágenes de tipo *dark*. Actualmente, los detectores tienen valores de corriente de oscuridad despreciables, de manera que el primer paso consiste en tomar los datos de las dos noches que contienen imágenes de este tipo con diferentes tiempos de exposición con el objetivo de estudiar la evolución de dicho defecto de lectura de los CCDs al aumentar el tiempo. De esta manera, se comprueba si es despreciable. En caso de que no lo sea, será necesario restar su contribución.

Al realizar el análisis de los datos proporcionados en este caso se obtiene la Figura 3 en la que se observa el efecto mencionado. En ella se visualiza un ajuste lineal de los datos y uno cuadrático, siendo este último el óptimo en este caso. Si bien es cierto que ajustes de orden mayor como 3 o 4 proporcionan un valor menor del parámetro χ^2 ⁵ ($\chi_2^2 = 6,3513 \cdot 10^5$, $\chi_3^2 = 3,6181 \cdot 10^5$, $\chi_4^2 = 2,8014 \cdot 10^5$), la extrapolación a tiempos de integración mayores (como los empleados en las imágenes de ciencia) diverge para esos órdenes. Por este motivo, lo más adecuado es quedarse con el ajuste cuadrático, que no da este problema.

En ese caso, teniendo en cuenta que cada imagen individual de los datos de ciencia tiene un tiempo de integración de 60 s y que, tal y como ilustra la Figura 3, el incremento de cuentas por corriente de oscuridad esperado es de 21 cuentas, se puede afirmar que se obtiene un valor completamente irrelevante de la misma frente al número de cuentas medio de las imágenes (superior a 10000 cuentas en todas ellas).

Con este estudio se puede confirmar finalmente que la corriente de oscuridad en estos datos es despreciable, por lo que se pasa directamente al tratamiento con las imágenes de tipo *flat*. En este

⁴Hay una excepción en referencia a las imágenes de calibración para cada noche ya que la noche del 11 de noviembre emplea las mismas imágenes que la noche anterior. Además, entre las demás noches existen ciertas diferencias entre el número de imágenes de calibración, tiempos de exposición, etc.

⁵Este parámetro se emplea en estadística para cuantificar cómo de bueno es un ajuste en referencia a los datos que se disponen. El ajuste es mejor cuanto más bajo sea el valor de dicho parámetro (lo ideal sería obtener 0).

proceso, en cualquier caso, restamos la contribución de la emisión del cielo en la banda J , de manera que sustraemos la corriente de oscuridad que pudiera estar presente en los datos de ciencia.

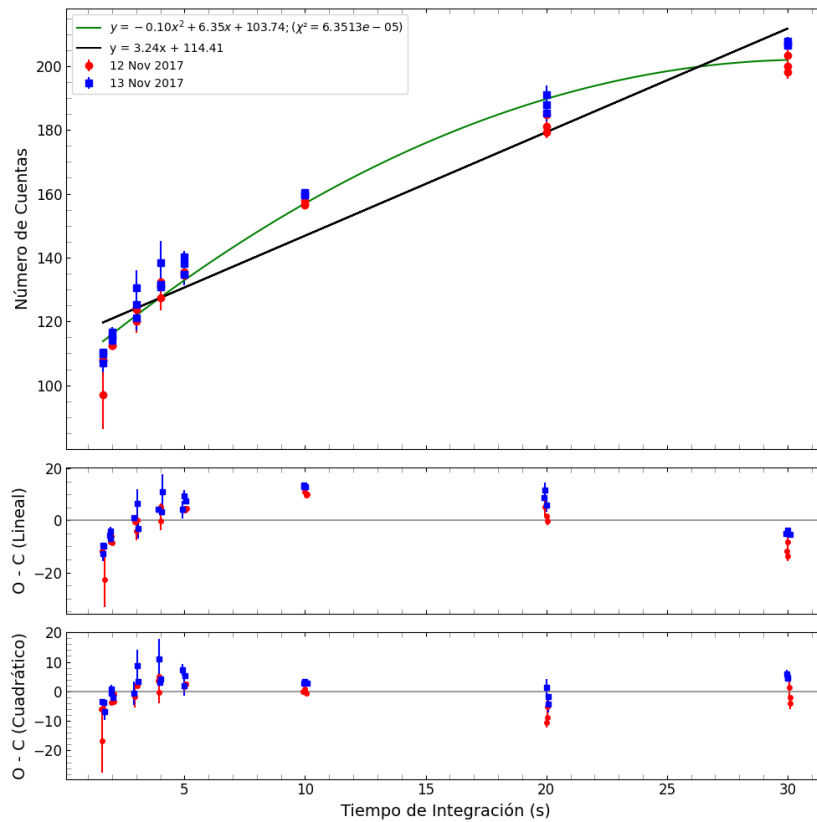


Figura 3: Gráficas de la evolución de la corriente de oscuridad con el tiempo. En el eje x se representa el tiempo de exposición de las diferentes imágenes, mientras que el eje y representa el número de cuentas. Los datos empleados corresponden a las noches 12/11/2017 y 13/11/2017. En la gráfica superior, los datos se presentan en color rojo y azul según la noche, con los errores correspondientes. Además se presentan los ajustes lineal y cuadrático a los datos en negro y verde, respectivamente. Finalmente, las gráficas inferiores corresponden a los residuos de los ajustes, lo que se denomina O-C (*observed minus calculated*): uno para el ajuste lineal (panel del medio) y otro para el ajuste cuadrático (panel inferior).

3.1.2. Imágenes *flat*

En esta sección se va a describir el procedimiento seguido para corregir las imágenes del efecto denominado *flat*, consistente en la variación de la sensibilidad del CCD en cada uno de sus píxeles. Para ello, se emplean imágenes de calibración de este tipo, las cuales se caracterizan por tener un tiempo de exposición igual al de las imágenes de ciencia que se pretenden estudiar y apuntar a una fuente de luz uniforme⁶, que puede ser el cielo (*sky flats*) o la propia cúpula del telescopio (*dome flats*). En este caso se tienen ambos tipos de imágenes, por lo que se compara cuál de ellas da mejores resultados. Se emplea la herramienta IRAF, en concreto los comandos *imcombine* para combinar imágenes, *imarith* para las restas entre estas e *imstat* para normalizar.

⁶Hay que tener en cuenta que estas imágenes también deben estar tomadas empleando el mismo filtro con el que se toman las imágenes de estudio.

El tratamiento para las imágenes de cúpula consiste en:

1. Combinar⁷ las imágenes con la luz de la cúpula apagada empleando la mediana.
2. Restar a cada imagen individual con la luz de cúpula encendida la combinación de imágenes obtenida en el paso anterior resultando imágenes *flat* sin contribución térmica.
3. Combinar de nuevo utilizando la mediana las imágenes con luz encendida restadas.
4. Normalizar las imágenes dividiendo por el número de cuentas medio de cada imagen.

El procedimiento seguido con los *flats* de cielo es el siguiente:

1. Se separan los campos de estudio de cada noche en conjuntos de imágenes con dispersión del número de cuentas medio menor a 5000 entre todas ellas.
2. Para cada conjunto, se combinan las imágenes empleando la mediana, la pesada por moda y eliminando entre 1 y 5 imágenes de los extremos (en número de cuentas) para obtener resultados mejores. Se obtiene así una imagen correspondiente al cielo que se debe sustraer de estas imágenes.
3. Para cada imagen individual del conjunto se resta la combinación mencionada en el paso anterior, es decir, el cielo.
4. Paralelamente al paso 3 se combinan los cielos de cada campo empleando la media y pesando por moda, obteniendo el *masterflat*, que debe normalizarse dividiendo por la media de cuentas.
5. Por último, se dividen las imágenes restadas de cada campo por su *masterflat* correspondiente, obteniendo finalmente las imágenes restadas de cielo y corregidas de *flat*.

Al comparar el resultado de este tratamiento con las imágenes de *flats* de cúpula, se observa que los *flats* de cúpula no proporcionan resultados con la misma calidad que los *flats* de cielo obtenidos mediante la combinación de los distintos cielos de los apuntados, por lo que optamos por las imágenes de ciencia con sus *masterflats* a partir de este punto del trabajo.

El resultado del procedimiento anterior, que incluye la sustracción de cielo en todas las imágenes y su posterior división por el *masterflat* para eliminar los defectos del detector, se muestra en las Figuras [4](#) y [5](#), donde se comparan imágenes ejemplo de dos campos antes y después de aplicarse los pasos descritos, entre otras.

Cabe mencionar la necesidad de cambiar el procedimiento para un campo, 6_3, en el que sus últimas 50 imágenes presentaban gran dispersión en el número de cuentas, resultando incoherente tratarlo como los demás. En ese caso, el cielo se ha sustraído restando las imágenes entre sí de manera sucesiva. Los pasos a partir de ese punto son idénticos. No obstante, es importante comentar que el *masterflat* de esta noche no incluye ningún dato respectivo a dichas imágenes.

⁷Todas las combinaciones realizadas en estos pasos se pesan por moda, poniendo en primer lugar la imagen con el número de cuentas medio, siendo la que se coge de referencia.

3.1.3. Alineación y combinación final

Una vez realizada la corrección mencionada en la sección anterior, se deben alinear las imágenes de cada campo tomando como referencia la primera de ellas. Esto es necesario debido a que, durante la toma de las observaciones, se varía ligeramente la posición de apuntado del telescopio, de manera que se facilite la sustracción del cielo como se describe en los pasos de reducción anteriores.

Para ello, empleando IRAF junto con DS9⁸, se visualizan las imágenes de cada campo una a una, tomando una estrella de referencia de la cual se anotan sus coordenadas (x,y) en cada una de ellas en un fichero, que se denomina fichero *shifts*. Al restar todas las filas a la primera (esta fila primera resulta por tanto 0,0) lo que obtenemos es el *offset* o desplazamiento con respecto a la posición inicial (primera imagen de cada campo) del resto de apuntados (imágenes), que presenta un tamaño típico de 33.74 arcsec. Este fichero, junto con la imagen de referencia y unas 8/9 estrellas de referencia que se han preseleccionado en la primera imagen caracterizadas por tener una determinada FWHM, se introducen como parámetros de la función *imalign* de IRAF, que da como resultado una lista con las imágenes alineadas y recortadas. El recorte o *trimming* es la consecuencia de una correcta alineación, ya que todas las imágenes finales deben tener las mismas dimensiones y, al ir variando ligeramente la posición del telescopio entre apuntados como se comentó anteriormente, los bordes de las imágenes (excluyendo la de referencia) no son comunes a las demás.

Existen dos campos excepcionales a este tratamiento, pues como se puede observar en la Tabla 1, los campos 2_3 y 6_3 se han tomado entre dos noches. Por esta razón, es importante ver la diferencia entre las condiciones de observaciones de ambas noches en cada caso. Para ambos campos, la diferencia de condiciones entre las dos noches es suficiente como para no poder combinar entre noches, por lo que obtenemos dos imágenes profundas alineadas en lugar de una sola. De cara al posterior análisis de datos, se evita estudiar objetos en estos campos para reducir los problemas. En concreto, el campo 2_3 da problemas al intentar alinear las imágenes de la segunda noche con la de referencia de la primera, lo cual indica gran diferencia en las condiciones entre los momentos que se tomaron y requiere retirar el campo para su estudio posterior.

Alcanzado este punto, el paso final para obtener la imagen profunda de cada uno de los campos consiste en la combinación de las imágenes alineadas. La combinación en este caso se prueba con la media y la mediana, comparando los valores de cielo y FWHM obtenidos en cada caso. Al realizar la comparación en diferentes campos se llega a la conclusión de que es la combinación con la media la que proporciona errores menores, que darán por tanto lugar a resultados mejores en los posteriores estudios con fotometría.

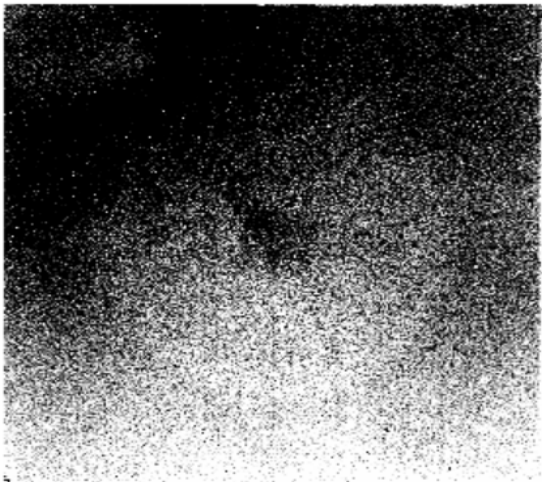
Los resultados y comparación de las imágenes antes y después de este tratamiento se presentan en las Figuras 4 y 5 junto con las mencionadas para el *flat* para dos campos diferentes.

3.2. Fotometría

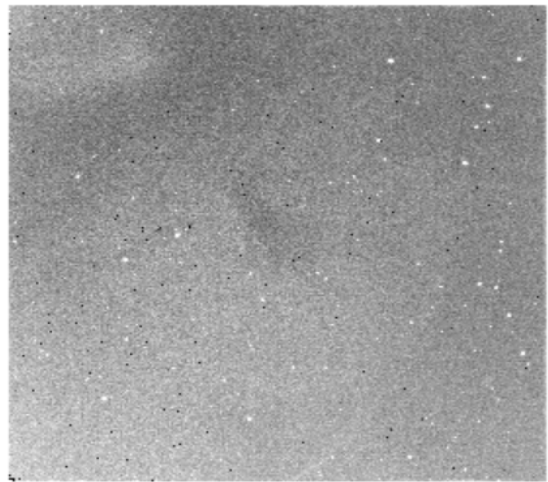
Una vez las imágenes están tratadas, reducidas y preparadas para obtener datos de ciencia, se empieza el estudio de la fotometría. El procedimiento en esta parte del trabajo se puede dividir en dos subtécnicas diferentes, realizadas en el mismo orden que se presentan en el actual documento.

En esta sección el objetivo es obtener las magnitudes de los objetos subestelares del campo para, tras ubicar objetos de interés, obtener su flujo observado en la banda *J*. De esta manera, es posible comparar resultados con los obtenidos en [Zapatero Osorio et al. 2014](#), además de obtener un diagrama

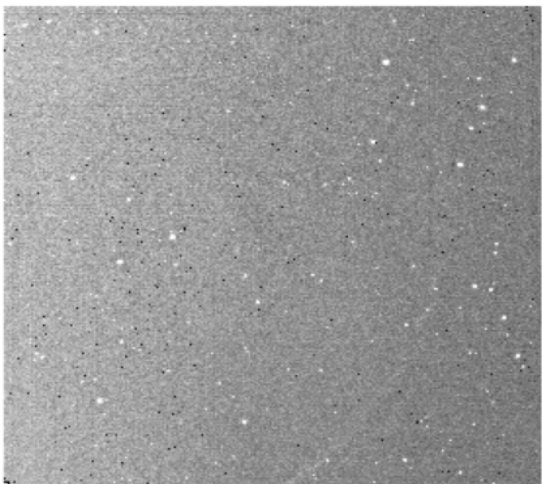
⁸<https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>



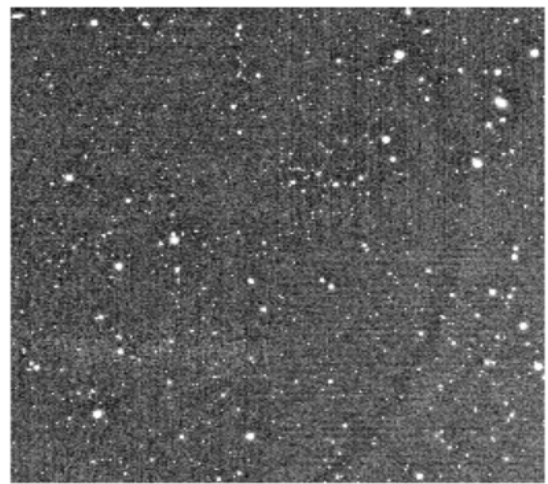
(a)



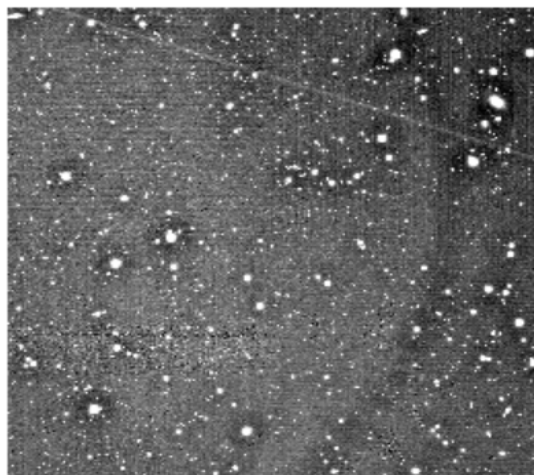
(b)



(c)



(d)



(e)

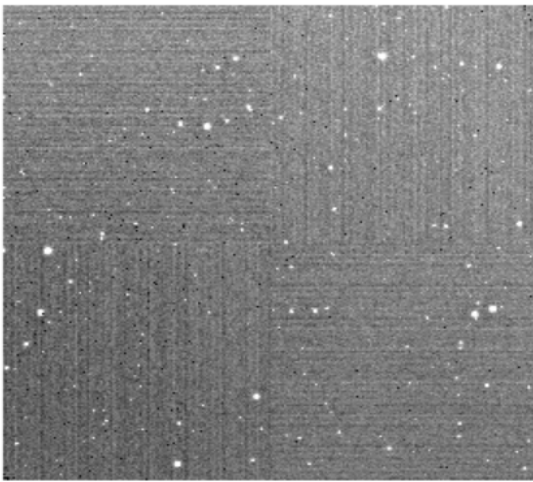
Figura 4: Imágenes que muestran el paso a paso de la reducción. Las tres primeras figuras corresponden a la primera imagen del campo 1_1 siendo: a) imagen cruda, sin tratar, b) imagen con el cielo restado, c) imagen con el cielo restado y dividida por el flat. Por otro lado, las figuras d) y e) corresponden a la combinación de todas las imágenes alineadas del campo 1_1 con mediana y con media, respectivamente.



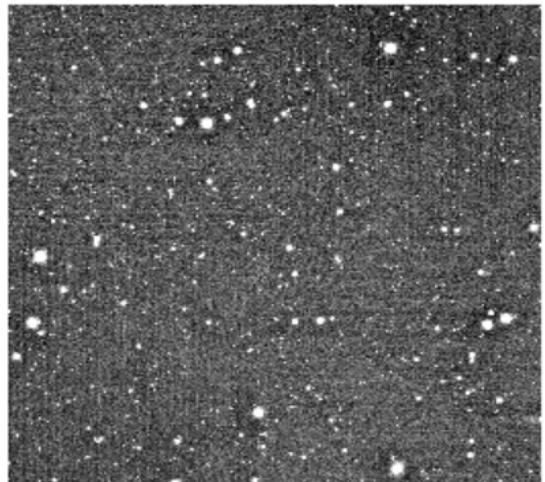
(a)



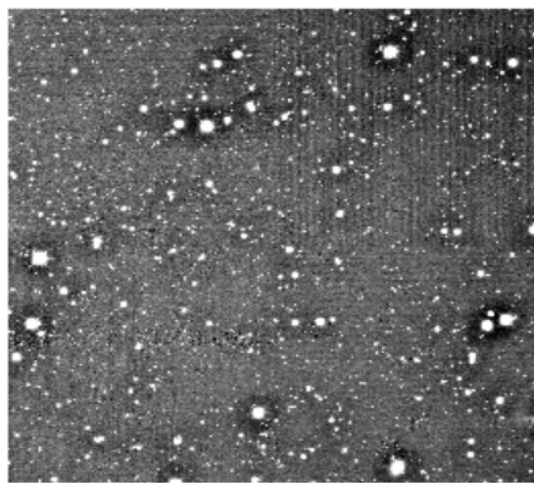
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5: Imágenes que muestran el paso a paso de la reducción. Las tres primeras figuras corresponden a la primera imagen del campo 3_1 siendo: a) imagen cruda, sin tratar, b) imagen con el cielo restado, c) imagen con el cielo restado y dividida por el flat. Por otro lado, las figuras d) y e) corresponden a la combinación de todas las imágenes alineadas del campo 3_1 con mediana y con media, respectivamente.

color-magnitud (CMD) para todos los objetos del campo. En concreto, se toman 3 objetos de entre los presentados en la Tabla 1 del artículo mencionado, de forma que a partir de esta sección el trabajo se centra en el estudio únicamente de los campos en los que se encuentran los objetos seleccionados. Para dicha selección se emplea la Figura 2 que facilita la ubicación de los posibles objetos subestelares de estudio en los distintos campos que se disponen. En este caso, los 3 objetos que se eligen son los presentados en la Tabla 2

Tabla 2: Objetos subestelares a estudiar en el actual trabajo. Se presenta el nombre del objeto, su posición en el cielo y el campo en el que se encuentra de entre los presentados en la Tabla 1. Los nombres de los objetos se toman del artículo [Zapatero Osorio et al. 2014](#).

Nombre del objeto	RA(J2000)	DEC(J2000)	Campo
Calar Pleiades 21	$3^h47^m00,36^s$	$+23^\circ21'56,8''$	Campo2_1
Calar Pleiades 24	$3^h46^m48,67^s$	$+23^\circ28'48,7''$	Campo2_1
Calar Pleiades 25	$3^h48^m26,62^s$	$+22^\circ51'53,9''$	Campo1_4

3.2.1. Fotometría de apertura

En primer lugar, se realiza fotometría de apertura con IRAF. Para ello, se emplean los comandos *daofind* y *phot*. Con estas herramientas lo que se consigue es obtener la magnitud instrumental en el filtro *J* (filtro empleado para tomar las observaciones de ciencia que se analizan en el trabajo) de la mayoría de los objetos del campo, incluyendo la magnitud para los objetos de interés, los Calares.

Por una parte se emplea *daofind*, que selecciona las estrellas del campo en función del ruido medio del cielo obtenido tras las calibraciones, la FWHM media de las estrellas y el límite introducido por el parámetro *threshold*. De esta manera, es importante tomar el ruido correspondiente al campo, FWHM obtenida para las estrellas del mismo y un *threshold* que permita obtener un número razonable de objetos, intentando minimizar aquellos fuera de los intereses pero incluyendo los objetos débiles⁹.

Por otro lado, *phot* selecciona un radio de 4.5 veces la FWHM alrededor de las estrellas y varios radios más grandes, con el objetivo de medir la diferencia entre ellos y sustraer el valor del flujo correspondiente al cielo residual, es decir, las pequeñas diferencias que de imagen a imagen puede haber tras restar un cielo promedio computado a lo largo de varias horas de integración.

Este procedimiento se ha seguido variando los valores comentados como determinantes para obtener diferentes números de objetos con el objetivo de conseguir el mejor resultado posible. Finalmente, se obtiene un fichero con las magnitudes instrumentales en *J* para los objetos obtenidos con *daofind* y sus incertidumbres¹⁰

3.2.2. Fotometría PSF

A continuación se realiza fotometría PSF empleando el comando *psf* en IRAF. Para ello, se identifican estrellas de referencia PSF en cada campo, para las cuales la función se corresponde con la de una estrella, evitando coger galaxias u otros objetos que den lugar a errores. Además, otra propiedad

⁹Es importante incluir los objetos débiles ya que nuestros objetos de interés lo son.

¹⁰Hay que tener en cuenta que las magnitudes obtenidas en este punto son instrumentales, es decir, es necesario comparar con la magnitud *J* en 2MASS para obtener la magnitud real.

necesaria que deben cumplir las estrellas empleadas para definir la PSF por imagen es que no tengan compañeras u otras fuentes próximas que contaminen la fotometría. Una vez realizado este paso se lanza el comando *allstar*, que aplica la función PSF calculada en el paso anterior a las estrellas identificadas con la fotometría de apertura, seleccionando solo aquellas que tienen esa misma PSF.

Al realizar todos los pasos mencionados se obtiene un fichero con los objetos identificados que cumplen las condiciones de interés, con sus posiciones y magnitudes instrumentales correspondientes.

Para calcular las magnitudes reales, se comparan los objetos obtenidos con los datos de *surveys* como 2MASS. Buscando en 2MASS con las coordenadas de los objetos de interés y tomando como referencia unas 7 estrellas fáciles de identificar en ambas imágenes para cada campo, se obtiene la diferencia entre magnitudes instrumentales obtenidas en este trabajo con las magnitudes reales. De esta manera se calcula una media de la diferencia entre ambas magnitudes, que se aplica posteriormente a todas las estrellas del campo, resultando las magnitudes reales (calibradas) de estas^[11]. Estos valores de ΔJ para cada campo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de ΔJ para los campos analizados con fotometría profunda. La diferencia se define como $\Delta J = j - J$, siendo j la instrumental calculada con IRAF en el trabajo y J la obtenida con 2MASS.

Campo	ΔJ (mag)
Campo1_4	1.513 ± 0.062
Campo2_1	1.4515 ± 0.085

Una vez obtenidos los resultados de fotometría para el filtro J , se puede calcular la magnitud límite J_{lim} y la magnitud de completitud J_{comp} de cada campo estudiado, donde J_{comp} se define como la magnitud del campo donde se obtiene el número máximo de objetos, mientras que J_{lim} corresponde a la magnitud donde el número de objetos observados cae a un 30% del máximo obtenido en J_{comp} .

Para visualizarlo se realizan histogramas para cada uno de los campos estudiados con fotometría, obteniendo la Figura 6.

Como se puede observar, tanto el valor de J_{comp} como el de J_{lim} obtenido para el campo 1_4 son menores que los obtenidos para el 2_1. Esto, teniendo en cuenta que se emplea el mismo instrumento para las observaciones, lo que indica es un cambio en las condiciones de las noches en las que se observan ambos campos. Si nos fijamos en la Tabla 1, vemos que los campos se observan en noches diferentes, presentando la noche del 12 de noviembre en que se observa el campo 1_4 un mayor valor del *seeing* (mayor valor de FWHM) que la noche del 11 de noviembre en que se observa el campo 2_1. Esto explica por qué tanto la magnitud de completitud como la límite son menores para el primero de ellos, alcanzando el segundo la detección de objetos más débiles, con valores de J real de hasta más allá de 24 mag. Sin embargo, el campo 1_4 alcanza poco más de 23 mag. Esta gran diferencia impide presentar los campos en un mismo histograma.

Además, la diferencia tan grande entre J_{lim} y J_{comp} indica la existencia de objetos “basura” que contaminan ciertamente los histogramas hacia las magnitudes más débiles. Esto es consecuencia de empujar la inclusión de fuentes con señal muy débil en los catálogos, que hace que se incluyan fuentes falsas en los mismos. Este procedimiento es estándar, sin embargo, en las búsqueda de fuentes de bajo brillo con movimiento propio significativo. En el estudio astrométrico, la inmensa mayoría de las fuentes

¹¹Lo que se obtiene realmente con este procedimiento es la constante instrumental del telescopio empleada para calcular magnitudes en la ecuación de Pogson.

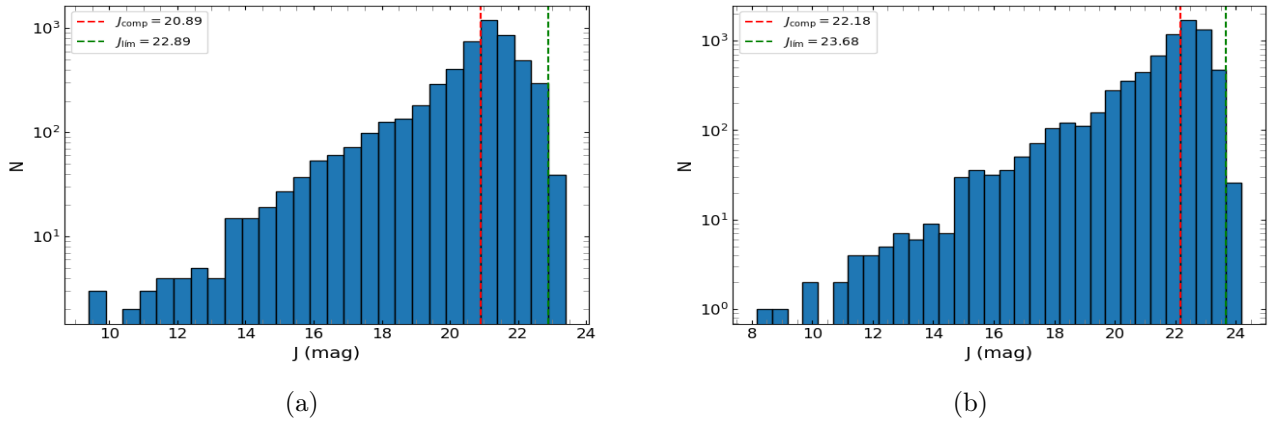


Figura 6: Histogramas correspondientes al número de objetos observados en cada campo de los estudiados para diferentes rangos de la magnitud real J obtenida en el análisis. La imagen de la izquierda corresponde al campo 1_4, mientras que la imagen de la derecha representa los valores obtenidos para el campo 2_1. En ambos casos, los datos se distribuyen en bins de 0.5 mag y se observan en azul. Por otro lado, las líneas rojas indican el valor de J_{comp} para cada campo, y las líneas verdes corresponden a J_{lim} . En este caso, se toma J_{comp} como el inicio del bin anterior al primer bin que se desvía de la función creciente, siendo esto lo más correcto al no conocer el valor exacto donde ocurre el máximo, y J_{lim} a la derecha del bin en que el número cae al 30 % de este.

falsas se eliminan naturalmente (véase más adelante).

Por otro lado, empleando los valores del filtro H tomados 10 años antes y proporcionados por las tutoras (obtenidos de [Zapatero Osorio et al. 2014](#)) junto con las magnitudes reales en J resultantes de nuestro estudio fotométrico, se puede realizar un diagrama de color CMD para cada campo. Esto se muestra en la Figura 7. Para ello, se realiza una técnica de correlación cruzada que permite identificar los objetos del actual estudio entre los proporcionados del artículo mencionado, empleando un radio de 0.1 píxeles (0.045 arcsec) para la correlación.

Se observa como las estrellas se distribuyen en una zona vertical mientras que para valores de $J - H$ mayores se obtiene una cola de objetos que corresponden a galaxias, que al ser más brillantes es posible observarlas a mayor distancia y, por tanto, enrojecidas. De nuevo, la diferencia de magnitudes alcanzadas para ambos campos se observa en la cantidad de objetos más enrojecidos. Por esta razón, de nuevo se presentan dos diagramas independientes para cada campo de forma individual.

Los errores de las magnitudes no se presentan en los CMDs para mayor claridad, pero se proporcionan en la Tabla 4 para los objetos de interés.

Por último, de los diagramas color-magnitud se observa la existencia de fuentes con colores $J - H$ azules. Estas fuentes, cuyo color sugiere que podrían ser enanas blancas calientes o fuentes falsas, no son objeto de estudio de este TFM.

Además, por su posición en el diagrama color-magnitud, Calar 21 y Calar 25 se confirman como objetos con un color $J - H$ rojo tal y como estaba publicado en la literatura, mientras que se arrojan dudas sobre la naturaleza roja de Calar 24.

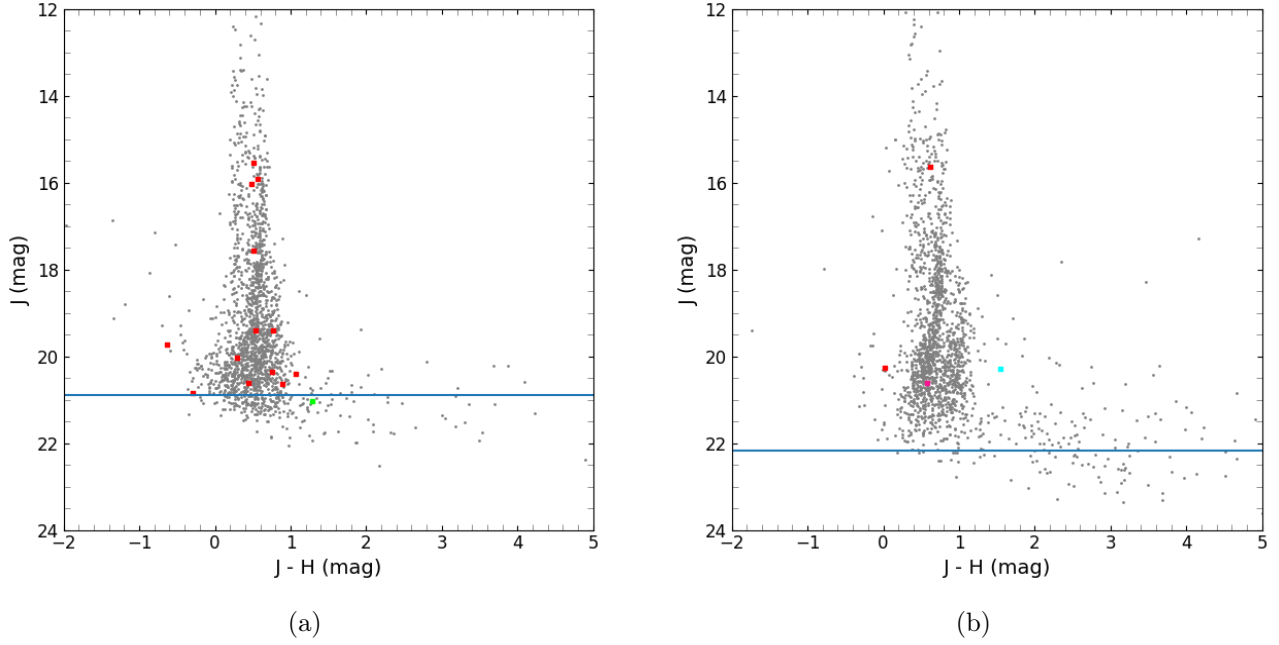


Figura 7: CMDs observados en cada campo de los estudiados. La imagen de la izquierda corresponde al campo 1_4, mientras que la imagen de la derecha representa el CMD obtenido para el campo 2_1. En ambos casos, los datos se presentan mediante puntos de color gris. Por otro lado, las líneas azules indican el valor de J_{comp} para cada campo. Por último, los objetos de diferentes colores son los de interés especial en este trabajo. En la primera imagen el punto de color verde presenta el objeto Calar 25. En la segunda imagen, se observa en color rosa el objeto Calar 24 y en azul Calar 21. Los objetos mostrados en rojo se corresponden con los nuevos candidatos presentados en las Tablas 5 y 6.

3.3. Astrometría

A continuación, empleando los resultados del análisis de las observaciones obtenidos en este trabajo junto con los datos proporcionados de los mismos campos en otras épocas (Zapatero Osorio et al. 2014), se estudian los objetos de interés de forma astrométrica.

Para ello, se disponen datos de los campos de interés para 3 épocas diferentes, con un período de 9 años entre las dos primeras y de 10 años entre la 2 y la 3.

- En primer lugar, la época 1 son datos tomados con el instrumento OmegaPrime (OP) en el filtro J , y son los más antiguos, por lo que sería ideal poder comparar nuestros datos con esta época para obtener mayor precisión de resultados astrométricos. Sin embargo, al estar tomados con otro instrumento, la relación entre las posiciones entre épocas no es lineal, y dado que el tiempo de este trabajo es limitado, no se emplean finalmente los datos de la época 1.
- En segundo lugar, la época 2 emplea el instrumento O2000 y el filtro H . En este caso, al emplear el mismo instrumento, la relación entre las posiciones de las épocas será lineal y sí es posible hacer astrometría a nivel del presente proyecto. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las magnitudes obtenidas para esta época son las correspondientes al filtro H , mientras que en el actual trabajo se han obtenido las magnitudes de los objetos en J .
- Por último, la época 3 representa las observaciones y resultados obtenidos en este trabajo.

Alcanzado este punto, el objetivo del estudio astrométrico se basa en la obtención de los movimientos propios de los objetos del campo, con especial interés en los objetos Calar Pleiades 21, Calar Pleiades 24 y Calar Pleiades 25, empleando los datos de las épocas 2 y 3. De esta manera, es posible confirmar los datos presentados en literatura hasta hoy y ampliar el conocimiento de ellos. Además, es posible obtener más objetos de interés con movimientos propios fuera de lo esperado (cerca de $\mu_{\alpha}\cos\delta = 0, \mu_{\delta} = 0$) para su estudio en profundidad en futuros trabajos o proyectos.

Para la obtención de los movimientos propios de cada uno de los campos se sigue el mismo procedimiento, consistente en los siguientes pasos:

1. Se emplea la herramienta TOPCAT^[12] para comparar las posiciones x,y (en píxeles) en las épocas 2 y 3, graficándolas en distintos colores, como se observa en la Figura 8. De esta manera, es posible buscar objetos identificables en ambas épocas, asegurando que se trata del mismo objeto, para obtener la diferencia de posición de los objetos entre ambas épocas. Se deben identificar al menos 3/4 objetos por campo y calcular una media.
2. Una vez se tiene el valor medio del cambio de posición entre épocas para cada eje y cada campo, se aplica a todos los objetos del campo para la época 2 y se compara con la época 3 para encontrar el mismo objeto. Este punto se realiza con diferentes bondades^[13] (en este caso 0.1 píxeles y 5.0 píxeles).
3. Con los objetos identificados, se emplea el fichero de objetos con bondad 0.1 pix y el comando *geomap* de IRAF para encontrar la transformación de coordenadas de forma precisa y su incertidumbre.
4. Con la transformación obtenida, se emplea el comando *geoxytran* de IRAF para aplicarla a las coordenadas de la época 2, de manera que se transformen en coordenadas de la época 3. En este caso, se emplea el fichero con bondad 5.0 pix, que encuentra más objetos (aquellos con movimientos propios más elevados, como es el caso de Calar Pleiades 21, Calar Pleiades 24 y Calar Pleiades 25, es decir, los de especial interés en este trabajo).
5. Con los datos transformados a la época 3, es posible restar las posiciones transformadas de la época 2 a las obtenidas en el trabajo desde un inicio para obtener el movimiento propio de los objetos en píxeles durante el tiempo entre épocas.
6. Como paso final, es necesario obtener los movimientos propios en unidades adecuadas, mas/yr^[14]. Para ello, se multiplica el valor obtenido en el paso anterior por 449.45 mas/pix y se divide entre el tiempo transcurrido entre épocas en años^[15]. Es importante mencionar que el valor obtenido para la componente del eje x, correspondiente a la ascensión recta (RA), precisa un cambio de signo, ya que la ascensión recta crece hacia la izquierda en las imágenes.

Aplicando los pasos presentados anteriormente, es posible obtener los diagramas mostrados en la Figura 9.

¹²<https://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>

¹³Error permitido en la comparación de posiciones entre épocas.

¹⁴mas=miliarcosegundo, yr=año

¹⁵La diferencia entre épocas se calcula empleando la fecha juliana. Se obtiene esta para ambos momentos exactos de observación y se calcula la diferencia. Esta diferencia está en días, de manera que dividiendo entre 365.25 se obtiene el valor en años.

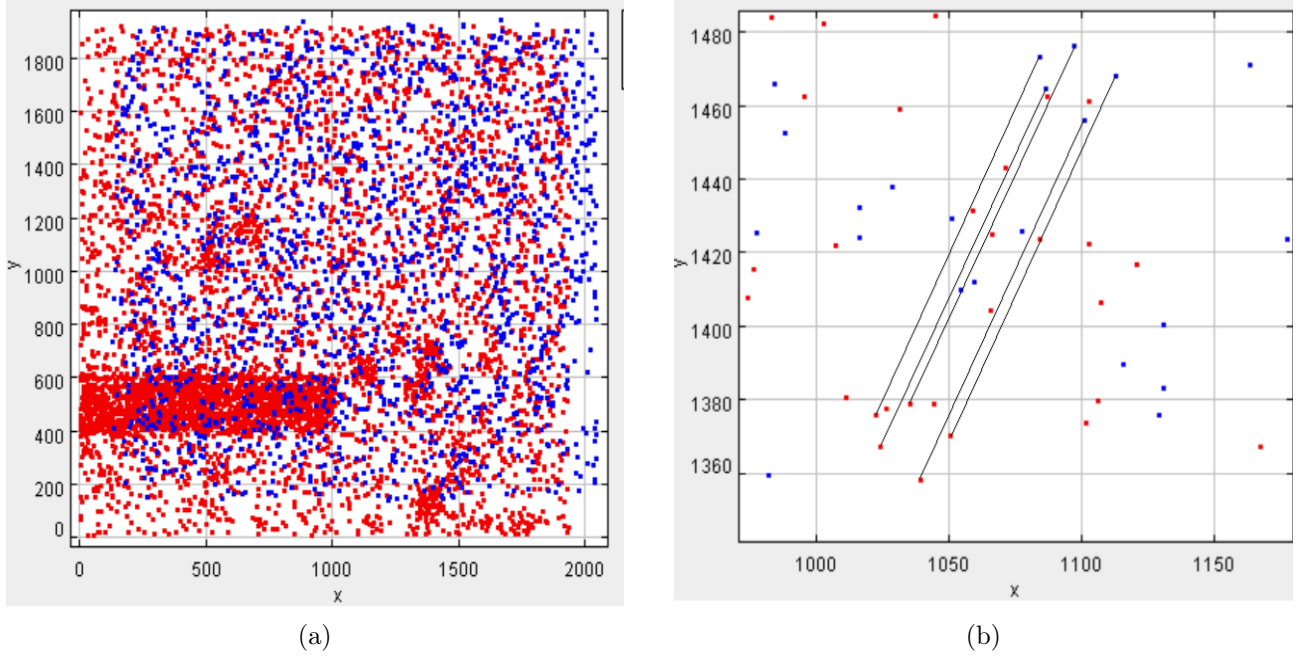


Figura 8: Ejemplo del procedimiento mencionado realizado con TOPCAT. El campo en este caso es 1_4. Se grafican en colores diferentes las coordenadas correspondientes a la época 2 y a la época 3, resultando el diagrama presentado en (a). Los puntos en rojo corresponden a la época 3, mientras que los azules corresponden a la época 2. Los ejes se encuentran en píxeles. Haciendo zoom en una zona, se busca un patrón que se repita en ambos colores y se calcula la diferencia entre los objetos correspondientes, es decir, la longitud de las líneas marcada en la figura (b). A partir de este punto, se puede calcular la media mencionada en el paso 3.

Se observa en la Figura 9 de esta manera el movimiento propio de los objetos Calar Pleiades 21, Calar Pleiades 24 y Calar Pleiades 25, que se presentan en más detalle, junto a los datos de fotometría, en la Tabla 4.

Cabe mencionar que se ha decidido presentar de nuevo dos diagramas de movimiento, individualmente para cada campo, debido a que la diferencia de las condiciones entre las noches de observación, y más concretamente entre los períodos de tiempo, de ambos dan lugar a valores muy distintos de las incertidumbres.

Tabla 4: Objetos subestelares estudiados en el actual trabajo. Se presenta el nombre del objeto, su posición en el cielo, la magnitud observada en el filtro J con su incertidumbre y el movimiento propio calculado para ellos. Los nombres de los objetos se toman del artículo [Zapatero Osorio et al. 2014](#).

Nombre del objeto	RA(J2000)	DEC(J2000)	J (mag)	μ (mas/yr)
Calar Pleiades 21	$3^h47^m00,36^s$	$+23^\circ21'56,8''$	20.282 ± 0.022	$(19.7, -38.2) \pm (3.9, 3.8)$
Calar Pleiades 24	$3^h46^m48,67^s$	$+23^\circ28'48,7''$	20.613 ± 0.027	$(3.3, -36.1) \pm (3.9, 3.8)$
Calar Pleiades 25	$3^h48^m26,62^s$	$+22^\circ51'53,9''$	21.029 ± 0.056	$(6.5, -37.1) \pm (6.4, 5.3)$

Teniendo en cuenta que el movimiento propio medio de las Pléyades obtenido con SIMBAD¹⁶

¹⁶Web: <https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=pleiades&submit=SIMBAD+search>

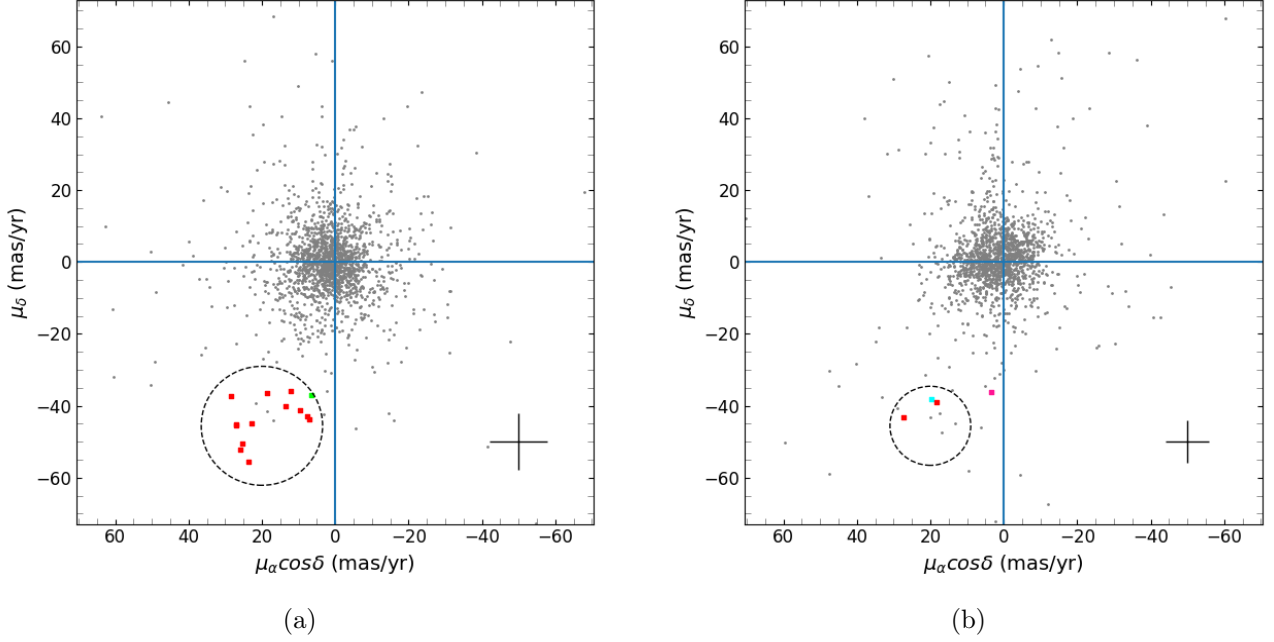


Figura 9: Diagramas de movimiento propio observados en cada campo de los estudiados. La imagen de la izquierda corresponde al campo 1_4, mientras que la imagen de la derecha representa el diagrama obtenido para el campo 2_1. En ambos casos, los datos generales se presentan mediante puntos de color gris. Por otro lado, las líneas azules delimitan los ejes $\mu_{\alpha} \cos \delta = 0$ y $\mu_{\delta} = 0$. Los objetos de diferentes colores son los de interés especial en este trabajo. En la primera imagen el punto de color verde presenta el objeto Calar Pleiades 25. En la segunda imagen, se observa en color rosa el objeto Calar Pleiades 24 y en azul Calar Pleiades 21. Los objetos mostrados en rojo se corresponden con los nuevos candidatos presentados en las Tablas [5](#) y [6](#). El valor del movimiento propio de las Pléyades se encuentra en $[(19.997, -45.548) \text{ mas/yr}]$, que se corresponde con el centro de los círculos negros de tamaño 2σ del error astrométrico obtenido para cada campo, cuyos radios son de 16.5 y 11.0 mas/yr, respectivamente. El error astrométrico se calcula teniendo en cuenta los errores en ambos ejes, dados por las incertidumbres de la transformación en IRAF (*geoxytran*) y de las posiciones en ambas épocas de los objetos. Los objetos dentro de este círculo se representan con cuadrados rojos y son de interés para posteriores estudios, por lo que se muestran con detalle en la Tabla [5](#). Por último, las cruces presentadas abajo a la derecha de cada diagrama corresponden al error promedio de todos los puntos del campo.

es $(19.997, -45.548) \pm (0.127, 0.101)$ mas/yr, vemos que los movimientos propios obtenidos no son compatibles con este. Sin embargo, al ser un cúmulo abierto, lo importante es ver si está dentro de un número de sigmas razonable, lo cual sí ocurre, especialmente para el objeto Calar Pleiades 21. Los otros dos Calares tienen unos movimientos propios algo diferentes a lo esperado, lo cual se comentará en la discusión de resultados. Cabe mencionar que el número de sigmas escogido en este trabajo se debe a que las medidas tienen sus niveles de confianza, y al ser nuestros objetos de interés de masa muy pequeña, y tener las Pléyades 133 Myr, es posible que su población dentro del cúmulo tenga movimientos más dispersos (teorema del virial) que las estrellas de tipo solar.

Por último, se presentan las Tablas 5 y 6 con los detalles de los objetos marcados en rojo en los diagramas de las Figuras 7 y 9, y que por tanto se proponen para futuros estudios debido al movimiento propio y magnitud que presentan.

Tabla 5: Campo 1_4. Objetos subestelares de interés para futuros estudios debido al movimiento propio y magnitud obtenidos para ellos en el actual trabajo. Se presenta la posición, la magnitud en J y el movimiento propio obtenido en cada caso.

Ident	Posición época 3 en x (pix)	Posición época 3 en y (pix)	J (mag)	μ (mas/yr)
1	320.652	604.024	19.41 ± 0.14	(23.532, -55.507)
2	903.171	539.181	19.967 ± 0.076	(25.8698, -52.136)
3	1637.664	922.966	17.565 ± 0.006	(25.3305, -50.399)
4	1753.299	381.709	19.73 ± 0.14	(27.108, -45.331)
5	1545.409	1464.058	16.024 ± 0.005	(26.910, -45.210)
6	1838.552	702.508	15.541 ± 0.004	(28.300, -37.231)
7	1574.981	1778.327	20.35 ± 0.14	(22.953, -44.845)
8	556.202	1014.361	19.409 ± 0.025	(18.561, -36.407)
9	467.981	1242.691	15.916 ± 0.003	(13.519, -39.964)
10	724.124	557.479	20.03 ± 0.13	(12.146, -35.996)
11	1190.139	1496.907	20.640 ± 0.079	(9.694, -41.131)
12	811.784	459.702	20.62 ± 0.21	(7.618, -42.909)
13	421.099	408.915	20.85 ± 0.15	(7.100, -43.758)

Tabla 6: Campo 2_1. Objetos subestelares de interés para futuros estudios debido al movimiento propio y magnitud obtenidos para ellos en el actual trabajo. Se presenta la posición, la magnitud en J y el movimiento propio obtenido en cada caso.

Ident	Posición época 3 en x (pix)	Posición época 3 en y (pix)	J (mag)	μ (mas/yr)
1	249.205	598.977	20.265 ± 0.058	(18.233, -38.908)
2	1903.873	770.006	15.641 ± 0.007	(27.350, -43.097)

En la línea del estudio realizado en este trabajo, los objetos de interés (mostrados en rojo en las Figuras 7 y 9) representan objetos con movimientos propios compatibles con las Pléyades dentro del sigma elegido. Además, se impone un corte de magnitud para la selección de todos los objetos dentro

de los círculos de movimiento propio, ya que el interés del trabajo se centra en enanas marrones y planetas, por lo que las fuentes que buscamos tienen que tener en las Pléyades magnitud J menor que 15.5 mag.

4. Discusión de resultados y conclusiones

Tras el análisis de las observaciones, la explicación del procedimiento seguido para ello y la muestra de los resultados más relevantes que se han obtenido en el estudio, es posible comentarlos y comparar con los obtenidos con anterioridad y presentados en la literatura.

Como se menciona al inicio del trabajo, el objetivo principal de este reside en la búsqueda de planetas errantes en el entorno de las Pléyades, tanto para la confirmación de algunos de ellos presentados en literatura previamente como para el descubrimiento de nuevos candidatos. De esta manera, es importante conocer las características de los objetos que buscamos para identificarlos en nuestros resultados. En concreto, buscamos los objetos Calar Pleiades 21, Calar Pleiades 24 y Calar Pleiades 25, caracterizados por ser objetos débiles, con magnitudes en el filtro J alrededor de 20-21 mag y movimientos propios similares al obtenido para las Pléyades ($[19.997, -45.548]$ mas/yr). Además, más allá de confirmar la membresía de estos objetos al cúmulo de las Pléyades y su categorización como planetas errantes, existe un segundo objetivo que corresponde a la ampliación de estos objetos. Por ello, resulta de interés visualizar las características de los demás objetos subestelares observados en los campos de estudio en busca de magnitudes débiles y movimientos propios que den lugar a la posible pertenencia al cúmulo de las Pléyades.

En referencia a estudios anteriores como [Zapatero Osorio et al. 2014](#), las observaciones que se emplean para el actual trabajo presentan un alcance mayor en profundidad, de forma que es posible obtener nuevos objetos de interés que no se habían observado antes con este propósito.

Siguiendo el orden del trabajo, lo primero que merece la pena mencionar son las condiciones fotométricas de las noches de observación. La cuantificación de dichas condiciones se observa levemente con el valor del *seeing* presentado en la Tabla [1](#). En ella se observan valores de este parámetro de entre 1 y 2 arcsec. Teniendo en cuenta que el *seeing* es una medida de cómo la atmósfera terrestre distorsiona la imagen de una fuente puntual, y por tanto, representa el tamaño angular aparente del disco estelar observado debido a esa distorsión, los valores obtenidos indican una calidad de imagen moderada en las observaciones astronómicas, determinada principalmente por la turbulencia atmosférica. En concreto, los campos 2_3 y 3_4 presentan mayores valores de este, suponiendo peor calidad de las observaciones. El resto de campos, sin embargo, presentan una calidad bastante buena. No obstante, la existencia de dicha turbulencia introduce errores y falta de precisión en las medidas, de manera que sería interesante realizar este estudio con observaciones de telescopios espaciales, si es posible, para evitar errores debidos a este factor.

Por otro lado, en este trabajo se han estudiado los objetos Calar Pleiades mencionados. No obstante, en la Figura [2](#) se observa que todos los objetos de interés de este tipo ([Zapatero Osorio et al. 2014](#)) caen en los campos obtenidos en las observaciones proporcionadas, de forma que es posible continuar el estudio empleando las técnicas de fotometría y astrometría como se explican en el trabajo para los campos restantes a los ya analizados y que presenten objetos de interés en su área. Así, será posible confirmar los planetas errantes ya estudiados en el artículo mencionado y ampliar aún más el número de objetos subestelares prometedores.

En referencia a la reducción de imágenes, se comenta en primer lugar la corriente de oscuridad. En la actualidad, los CCDs se sitúan en criostatos que mantienen una temperatura baja con el objetivo

de reducir esta corriente, como es el caso de O2000. Por este motivo, de manera general a día de hoy las imágenes no suelen precisar de corrección debido a este defecto. En cualquier caso, para asegurar la calidad, se realiza el estudio presentado en la Sección 3.1.1, donde se obtiene que, en efecto, la corriente de oscuridad no es relevante en nuestras imágenes. En caso contrario, se debería restar el número de cuentas obtenido en cada imagen correspondiente a este efecto.

En segundo lugar, las Figuras 4 y 5 presentan el paso a paso de la reducción, como se comenta en secciones anteriores. En ellas se puede observar como desaparece la sombra correspondiente al espejo primario en las primeras imágenes al corregir de *flat*. Sin embargo, también se ve, especialmente en la Figura 5(c), la estructura del CCD. Además, en las últimas imágenes de cada caso se observa la diferencia de combinación de las imágenes alineadas con mediana (d) o media (e). A pesar de que estéticamente la mediana proporciona mejor resultado, es la media la que proporciona dispersiones del cielo más adecuadas para la consecución de nuestros objetivos. Por último, cabe mencionar que, al igual que ocurre en las imágenes 5(d) y 5(e), donde se observa una línea curva más oscura y otra línea recta blanca provenientes de posibles objetos que contaminan las imágenes, otros campos reducidos presentaron bandas con un valor de ruido muy elevado o defectos similares, dando lugar a posibles errores.

Finalmente, los resultados de fotometría y astrometría obtenidos en el trabajo para los objetos de interés se pueden comparar con los presentados en literatura (Zapatero Osorio et al. 2014), resultando la Tabla 7.

Tabla 7: Objetos subestelares estudiados en el actual trabajo y en Zapatero Osorio et al. 2014. Se presenta el nombre del objeto, la magnitud observada en el filtro J con su incertidumbre en el actual trabajo (J_3), la magnitud observada en el filtro J con su incertidumbre en Zapatero Osorio et al. 2014 (J_1), el movimiento propio calculado en este trabajo (μ_3) y, por último, el movimiento propio obtenido en Zapatero Osorio et al. 2014 (μ_1). En ambos movimientos propios se presenta ($\mu_\alpha \cos \delta$, μ_δ).

Nombre del objeto	J_3 (mag)	J_1 (mag)	μ_3 (mas/yr)	μ_1 (mas/yr)
Calar Pleiades 21	20.282 ± 0.022	20.23 ± 0.08	$(19.7, -38.2) \pm (3.9, 3.8)$	$(25.4, -37.2) \pm (9.5, 9.5)$
Calar Pleiades 24	20.613 ± 0.027	20.65 ± 0.13	$(3.3, -36.1) \pm (3.9, 3.8)$	$(14.6, -45.5) \pm (9.1, 15.8)$
Calar Pleiades 25	21.029 ± 0.056	20.83 ± 0.15	$(6.5, -37.1) \pm (6.4, 5.3)$	$(19.8, -49.4) \pm (10.3, 12.5)$

En primer lugar, cabe mencionar los valores de las incertidumbres. Se observa como los valores obtenidos en este trabajo, presentados con el subíndice 3, presentan incertidumbres significativamente menores a los tomados de literatura, presentados con el subíndice 1. Esto implica una precisión mayor y, por tanto, mejores resultados, en los valores obtenidos en el actual estudio.

En segundo lugar, en referencia a los valores obtenidos para la fotometría, resulta muy interesante la compatibilidad en magnitudes para los tres objetos estudiados. Esto resulta muy satisfactorio, ya que implica que el procedimiento seguido en el actual TFM es correcto, además de confirmar parte de las características obtenidas con anterioridad para dichos objetos celestes.

Por otro lado, se observa que al igual que ocurre con fotometría, los resultados de astrometría obtenidos en este proyecto son compatibles con los presentados en la literatura. No obstante, los resultados del actual estudio difieren levemente de los esperados para alguno de los objetos, en especial Calar Pleiades 24 y Calar Pleiades 25, por lo que sería de interés repetir este procedimiento para una

cuarta época y ver como evolucionan.

En definitiva, el trabajo confirma Calar 21 y Calar 25 como miembros de las Pléyades con masa próxima a la planetaria, pero arroja dudas sobre la membresía de Calar 24, ya que ni su color $J - H$ ni su movimiento propio parecen ser lo esperado. Se observa en la Figura 9(b) que el movimiento propio de Calar 24 está a más de dos sigmas (fuera del círculo grande).

Por último, se presentan en las Tablas 5 y 6 los objetos nuevos candidatos para cada uno de los campos estudiados con fotometría y astrometría. De ellos, los más relevantes serán aquellos con magnitudes J_3 mayores de 19 mag aproximadamente, teniendo en cuenta la fotometría obtenida para los Calares Pleiades. No obstante, el movimiento propio tan elevado es interesante para cualquier objeto, en especial tan similar al de las Pléyades, por lo que sería pertinente el estudio en detalle de todos ellos. Para su futuro estudio se proporciona su localización en píxeles en los campos correspondientes en las observaciones empleadas en el actual trabajo. Con ello, se espera ampliar el número de planetas flotantes encontrados en las Pléyades.

Para concluir el trabajo, se propone el estudio de los Calares Pleiades restantes presentados en [Zapatero Osorio et al. 2014](#) para su confirmación, además de los objetos presentados en las Tablas 5 y 6 con el fin de ampliar el conocimiento de los objetos subestelares y su evolución. Asimismo, la búsqueda de objetos subestelares de las mismas características puede realizarse en otros cúmulos o estructuras similares con propiedades análogas a las de las Pléyades. Por otro lado, el empleo de la herramienta IRAF ha permitido ampliar el conocimiento en referencia al análisis y tratamiento de datos astrométricos. Por último, los resultados obtenidos han resultado satisfactorios y prometedores, suponiendo un pequeño avance en ese objetivo principal de la astrofísica que reside en conseguir entender la evolución y las propiedades de objetos subestelares, como se mencionaba al inicio del documento.

Referencias

- Alfonso, J., & García-Varela, A. 2023, [A&A](#), [677](#), [A163](#)
- Burningham, B., et al. 2013, [MNRAS](#), [433](#), [457](#)
- Chabrier, G., Baraffe, I., Allard, F., & Hauschildt, P. H. 2000, [ApJ](#), [542](#), [464](#)
- Cushing, M. C., Kirkpatrick, J. D., Gelino, C. R., et al. 2011, [ApJ](#), [743](#), [50](#)
- Delfosse, X., Tinney, C. G., Forveille, T., et al. 1997, [A&AS](#), [124](#), [349](#)
- Delorme, P., et al. 2010, [A&A](#), [518](#), [A39](#)
- Gagné, J., Moranta, L., Faherty, J. K., Kiman, R., Couture, D., Larochele, A. R., Popinchalk, M., & Morrone, D. 2023, [ApJ](#), [945](#), [119](#)
- Kirkpatrick, J. D., Reid, I. N., Liebert, J., et al. 2000, [AJ](#), [120](#), [447](#)
- Kirkpatrick, J. D., Cushing, M. C., Gelino, C. R., et al. 2011, [AJ](#), [142](#), [85](#)
- Kirkpatrick, J. D., et al. 2013, [AJ](#), [145](#), [2](#)
- Lotkin, A. V., & Beshenov, G. V. 2003, [Astron. Rep.](#), [47](#), [566](#)
- Lucas, P. W. & Roche, P. F. 2000, [MNRAS](#), [314](#), [858](#)
- Luhman, K. L. 2012, [ARA&A](#), [50](#), [65](#)
- Moles, M., et al. 2008, [PASP](#), [120](#), [821](#)
- Saumon, D., Hubbard, W. B., Burrows, A., et al. 1996, [ApJ](#), [460](#), [993](#)
- Soderblom, D. R., Nelan, E., Benedict, G. F., et al. 2005, [AJ](#), [129](#), [1616](#)
- Strauss, M. A., et al. 1999, [Nature](#), [395](#), [A9](#)
- Sumi, T., et al. 2011, [Nature](#), [473](#), [349](#)
- Tinney, C. G., & Reid, I. N. 1998, [MNRAS](#), [301](#), [1031](#)
- Tody, D. 1986, [SPIE](#), [627](#), [733](#)
- Zapatero Osorio, M. R., Béjar, V. J. S., Miles-Páez, P. A., et al. 2014, [A&A](#), [568](#), [A77](#)