

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ESCUELA DE DOCTORADO Y ESTUDIOS DE POSGRADO

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:

**Búsqueda de compañeros a gran separación de
estrellas jóvenes cercanas con GAIA**

Memoria presentada por **Bárbara Pérez Pérez** para la obtención del
título de Máster en Astrofísica por la Universidad de La Laguna

Tutor: **Víctor J. Sánchez Béjar**

San Cristobal de La Laguna

12 de julio 2024

Bárbara Pérez Pérez

Supervisor: Víctor J. Sánchez Béjar

Search for wide companions of nearby young stars with GAIA

Abstract

The identification of numerous young stars in the solar neighbourhood has led to large amount of research into stellar formation and evolution. The frequency of companions is a very important aspect in models of star and substellar formation, and the analysis of the population of young binaries at different ages provides very useful information on the frequency and evolution of binaries in their early phases. Finding substellar objects in Young Moving Groups (YMGs) with well-determined ages allows us to characterise their physical properties.

Although some YMGs, such as AB Doradus, β Pictoris, TW Hydra or Tucana-Horologium, have been well known since the late 1990s, recent studies with GAIA satellite have allowed us to identify thousands of stars belonging to these groups and even to discover other groups previously unknown.

The aim of this work is to explore the population of wide companions of nearby young stars using data from GAIA satellite. To achieve this goal, we have performed an astrometric and photometric search for companions with common distance and proper motion using GAIA DR3 (Data Release 3), in combination with other photometric catalogues such as 2MASS. The search has been performed on the following YMGs: TW-Hydrae (TWA; 10 Myr, 60 pc), 32 Orionis (32ORI; 22 Myr, 96 pc), β Pictoris (β PIC; 24 Myr, 30 pc), Columba (COL; 42 Myr, 50 pc), Tucana-Horologium (THA; 45 Myr, 46 pc), Carina (CAR; 45 Myr, 60 pc), Volans-Carina (VCA; 90 Myr, 86 pc), AB Doradus (ABDMG; 150 Myr, 30 pc), Carina-Near (CARN; 200 Myr, 30 pc) y Oceanus (OCE; 500 Myr, 2-50 pc).

First, we performed an extensive compilation of the members and candidate members of each YMG using the Simbad database. Using the TOPCAT tool, these members were correlated with the GAIA DR3 and 2MASS catalogues within a 1" radius, and both their astrometric and photometric parameters were obtained. Although we have searched for companions around all the members and candidate members, only those with a membership probability $\geq 68\%$, one standard deviation (1σ) in a normal distribution, have been considered. In total, 2.535 membership candidates were collected, of which 1.713 had a probability of membership of $\geq 68\%$.

Subsequently, we performed a search for companions around the members of each YMG, up to at least a separation of 10.000 AU, using as search criteria a parallax difference of less than 4 mas and a proper motion difference of less than 8 mas/yr. As it was observed that some closer companions might have a larger difference in proper motion due to orbital motion, we performed a second search without a proper motion constraint

up to a separation of $20''$, which is equivalent to a physical separation of at least 200 AU for the closest stars. In addition, the masses of the members and their companions were calculated using GAIA models.

During this process, we checked the completeness of the search and discarded as contaminants several companions that turned out not to be photometrically good, as they did not follow the photometric sequences of the YMG members in the MG versus G-J diagrams. We have determined that our search for brown dwarf companions is not limited by the GAIA limiting magnitude of $G < 20,41$ mag, although it is limited to angular separations larger than $0.5''$ and is not complete for separations lower than $3''$. As for planetary mass companions, in most cases we are indeed constrained by the GAIA limiting magnitude. Moreover, it has been shown that some companions can be lost due to lack of astrometric data from GAIA. In fact, about 10 known companions have not been found in our search because of missing astrometric data in GAIA DR3, possibly because they are close binaries.

On the other hand, we have determined that the amount of contaminants in our statistics is not significant up to separations larger than 10.000 AU and, by construction, our search is only complete up to these separations.

As a result of this work, we have classified as companion candidates 289 already known objects and 144 new objects that were not previously known. In TWA, we have identified 16 companion candidates in 16 systems in our search around 101 members, where 7 are substellar companion candidates. In 32ORI, out of 55 search members, we found 7 companions in 6 systems, but none substellar. In β PIC, we have found 49 companions in 44 systems in our search around 254 members, 9 of them substellar. In COL, from our search around 225 members, we have found 47 companion candidates in 44 systems, of which 3 are substellar. In THA, we have identified 31 companions in 29 systems, 2 of them substellar, having searched around 302 members. In the search around 112 CAR members, we found 11 companions in 10 systems, but none of them substellar. For the search around 66 VCA members, we found 4 systems but none substellar. In ABDMG, we identified 87 companion candidates in 84 systems in our search around 443 members, 5 of them substellar. In CARN, we searched around 84 members and found 13 companions in 13 systems, of which only 1 is substellar. Finally, from the search around 71 members in OCE, we have identified 11 companions in 10 systems, but none of them substellar.

The frequency of companions, both stellar and substellar, has been calculated for each YMG at physical separations ≤ 10.000 AU. We have found that wide companions around stars are not very frequent ($\sim 15 \pm 1\%$), especially those with substellar companions, where the frequencies obtained vary between 1-5%. Although there does not seem to be any relationship between the frequency of stellar companions and age, we can say that there is a trend in the number of wide substellar companions with age. The youngest YMGs, aged ~ 20 Myr, have companion frequencies of $\sim 4\%$, while YMGs aged ~ 50 Myr or older have frequencies of $\sim 1\%$.

This decrease in the frequency of substellar companions with YMG age can be ex-

plained by the dynamical evolution of these systems, which may be disrupted due to encounters with other stars and gas clouds over time. However, the differences obtained are not fully significant, since the number of substellar companions is low and therefore the error bars are large.

To conclude, we have obtained a complete catalogue of young stars belonging to 10 YMGs in the solar neighbourhood, which will be useful which will be useful for future searches for close companions using data from missions such as Euclid and by using adaptive optics.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetos subestelares: enanas marrones y objetos de masa planetaria	1
1.2. Binarias estelares y subestelares	4
1.3. Compañeros a gran separación	5
1.4. Young Moving Groups	6
1.5. Misión GAIA y Data Release 3	8
2. Objetivos	10
3. Metodología	11
3.1. Selección de Young Moving Groups	11
3.2. Búsqueda de compañeros	15
3.3. Cálculo de masas con modelos de GAIA	18
4. Resultados y discusión	19
4.1. Resultados generales	19
4.2. Completitud y contaminantes	19
4.3. Frecuencia de compañeros	25
4.4. Compañeros interesantes	28
5. Conclusiones y trabajo futuro	33
Bibliografía	35
A. Tablas de datos	39

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetos subestelares: enanas marrones y objetos de masa planetaria

En la diversidad del universo, las enanas marrones se ubican en una posición intermedia entre las estrellas y los planetas. Las enanas marrones junto con los objetos de masa planetaria (OMPs) constituyen el conjunto de los objetos subestelares, que son esenciales para entender tanto la formación y evolución estelar como la naturaleza de los sistemas planetarios. Las enanas marrones, en particular, son objetos cuya masa es insuficiente para iniciar la fusión del hidrógeno en sus núcleos, diferenciándolas de las estrellas. Estos cuerpos ofrecen una valiosa oportunidad para estudiar los límites de la formación estelar y planetaria.

Las enanas marrones presentan masas que oscilan entre, aproximadamente, 13 y 75 M_J , situándose entre los planetas gigantes y las estrellas de menor masa. Debido a la falta de fusión sostenida de hidrógeno en sus núcleos, son laboratorios naturales para investigar la física de objetos fríos y débiles. Por otro lado, los OMPs tienen masas inferiores a las de las enanas marrones, y pueden solaparse con las de los planetas más masivos. Estos objetos son cruciales para comprender los procesos de acreción y formación planetaria en discos protoplanetarios (Figura 1.1).

La existencia de una masa mínima necesaria para la quema estable de hidrógeno fue predicha por primera vez por Kumar en 1963 (Kumar 1963), que estableció un límite mínimo de masa estelar en 0.07-0.09 M_\odot , dependiendo de la metalicidad, y denominó a estos objetos incapaces de fusionar hidrógeno de manera estable “enanas negras”. Sin embargo, este término también se utilizaba para referirse a las enanas blancas en su etapa final de enfriamiento teórico (Mestel & Ruderman 1967), por lo que otros nombres propuestos incluían “enanas infrarrojas” (Davidson 1975), “super-Júpiteres” o “enanas rojas extremas”. En 1975, Jill Tarter sugirió el término que ha prevalecido: “enanas marrones” (Tarter 1975).

El descubrimiento observacional de las enanas marrones ocurrió décadas después de su predicción teórica, en el año 1995, cuando dos grupos publicaron casi simultáneamente

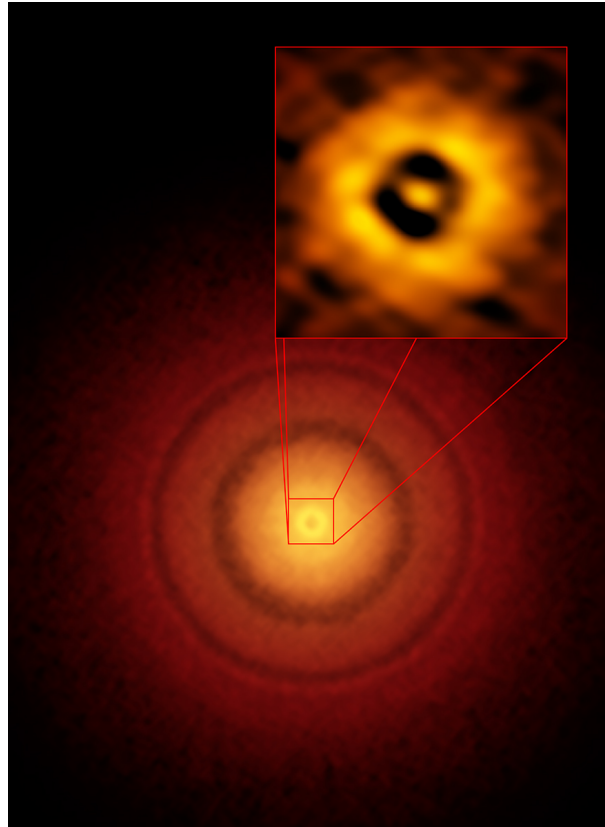


Figura 1.1: Imagen generada por ALMA del disco protoplanetario alrededor de la joven estrella V^* TW Hya, similar a nuestro Sol. La imagen del recuadro (en la parte superior derecha) muestra un vacío oscuro cerca de la estrella, a una distancia similar a la que existe entre la Tierra y el Sol: un indicio de que el polvo y el gas allí presentes podrían estar dando nacimiento a un planeta. Las demás zonas concéntricas más brillantes y más oscuras representan otras zonas de formación planetaria. Credit: S. Andrews (CfA); B. Saxton (NRAO/AUI/NSF); ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

sus descubrimientos. El primero, Teide 1, fue una enana marrón aislada perteneciente a la asociación estelar de las Pléyades, descubierta en un estudio fotométrico realizado por Rafael Rebolo, M. Rosa Zapatero Osorio y Eduardo Martín (Rebolo et al. 1995). El segundo, GJ 229B, fue una enana marrón compañera de una estrella de tipo M, descubierta mediante coronografía por Tadashi Nakajima y colaboradores (Nakajima et al. 1995).

Existe un fuerte debate sobre la diferencia entre las enanas marrones y los planetas. Uno de los criterios propuestos para diferenciarlos es la capacidad de quemar deuterio en sus interiores: los objetos con masas superiores a la masa mínima para la quema de deuterio se denominan “enanas marrones”, mientras que los objetos con masas inferiores a este límite se denominan “planetas” (Basri 2000). Otro esquema de clasificación se basa en su proceso de formación: los objetos formados de manera aislada o en sistemas a partir del colapso de una nube, que no pueden fusionar hidrógeno de manera estable, serían llamados “enanas marrones”, independientemente de su masa. Sólo los objetos formados en un disco protoplanetario alrededor de una estrella serían denominados “planetas” (Chabrier et al. 2005). Esta clasificación es problemática porque a veces no es posible determinar el proceso de formación de un objeto subestelar de baja masa.

Respecto a esta problemática, la Unión Astronómica Internacional (IAU) no ha adoptado una definición estricta basada únicamente en la masa para separar planetas de enanas

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

marrones. En cambio, la definición de trabajo considera también la formación y la ubicación del objeto, considerando que un planeta es un objeto que se forma en un disco protoplanetario alrededor de una estrella y no en el proceso de colapso de una nube molecular, como las estrellas y las enanas marrones (Lecavelier des Etangs & Lissauer 2022).

Durante sus primeras etapas evolutivas, los objetos de muy baja masa (incluyendo estrellas y objetos subestelares) se contraen debido a la autogravedad, lo que aumenta la densidad y la temperatura en su interior. Luego, esta contracción se detiene debido al inicio de reacciones termonucleares si el objeto es lo suficientemente masivo para alcanzar la temperatura central requerida, o debido a la degeneración electrónica si no lo es. Stevenson (1978) proporciona una descripción detallada de las fases en la evolución de una enana marrón:

- **Fase de Colapso:** Durante su formación, la enana marrón sigue la línea de Hayashi a una temperatura efectiva aproximadamente constante y se contrae, disminuyendo progresivamente su luminosidad. En esta fase, el interior es totalmente convectivo y la contracción ocurre de manera adiabática.
- **Quema de Deuterio:** Si el objeto tiene una masa superior a $0.013M_{\odot}$, entra en una fase pseudo-secuencia principal, en la cual se quema deuterio. Esta fase es rápida y dura unos pocos millones de años (decenas de millones de años en las enanas marrones menos masivas). Durante esta fase, la luminosidad es relativamente estable.
- **Enfriamiento Degenerado:** Después de la fase de quema de deuterio, la enana marrón comienza a enfriarse nuevamente y su luminosidad vuelve a disminuir.

Las estrellas de baja masa que son capaces de quemar hidrógeno, alcanzan la Secuencia Principal (MS) y permanecen en ella durante la mayor parte de sus vidas. Las estrellas más masivas alcanzan la MS más rápidamente y pasan muy poco tiempo en la fase inicial de contracción. Por otro lado, los objetos subestelares que no pueden alcanzar altas temperaturas centrales, continúan enfriándose con el tiempo a medida que se contraen. Una de las consecuencias de esto es que su temperatura efectiva y su tipo espectral evolucionan con su edad, lo cual representa un desafío al intentar caracterizar tanto sus propiedades físicas como sus masas.

Comprender los diferentes escenarios de formación para los objetos subestelares es una de las principales preguntas abiertas en astronomía hoy en día, y se están llevando a cabo importantes esfuerzos, tanto teóricos como observacionales, para resolver este problema. Actualmente, los principales modelos de formación subestelar, tanto para enanas marrones como para objetos de masa planetaria, son los siguientes:

- **Colapso gravitacional de nubes moleculares:** este modelo propone que las enanas marrones se forman de manera similar a las estrellas, mediante el colapso gravitacional de pequeñas regiones densas dentro de nubes moleculares (Padoan & Nordlund 2004). Estas regiones no alcanzan la masa necesaria para iniciar la fusión de hidrógeno, por lo que se convierten en enanas marrones.

- **Fragmentación de nubes:** en este modelo, las enanas marrones se forman como fragmentos secundarios durante la fragmentación de una nube molecular que colapsa. Estos fragmentos pueden ser eyectados del sistema principal debido a interacciones dinámicas, terminando como enanas marrones aisladas (Bate et al. 2003).
- **Erosión de núcleos:** este modelo sugiere que las enanas marrones pueden formarse a partir de núcleos que inicialmente tenían el potencial de formar estrellas pero que, debido a la radiación ionizante de estrellas masivas cercanas, perdieron parte de su masa (Whitworth & Zinnecker 2004).
- **Acreción del núcleo:** este modelo describe la formación de planetas a través de la acumulación de partículas sólidas en un disco protoplanetario alrededor de una estrella joven (Pollack et al. 1996).
- **Fragmentación del disco:** este modelo sugiere que los objetos subestelares podrían formarse a partir del colapso gravitacional de los fragmentos resultantes de la fragmentación directa de un disco protoplanetario masivo que se vuelve gravitacionalmente inestable (Boss 2001).

Cada modelo de formación subestelar explica diferentes mecanismos y procesos que pueden llevar a la formación de enanas marrones y objetos de masa planetaria. La evidencia observacional y las simulaciones numéricas continúan refinando nuestra comprensión de estos procesos.

1.2. Binarias estelares y subestelares

Los sistemas binarios, consistentes en dos cuerpos que orbitan un centro de masa común, son fenómenos comunes tanto entre las estrellas como entre los objetos subestelares. Estos sistemas han sido objeto de numerosos estudios, revelando datos esenciales sobre la evolución de las estrellas, la transferencia de masa y las colisiones entre cuerpos estelares. No obstante, los sistemas binarios subestelares presentan retos particulares debido a su baja luminosidad y masa, lo que complica su detección y análisis. Aún así, son cruciales para evaluar las teorías sobre la formación de objetos subestelares y la dinámica de cuerpos de baja masa.

Michell (1767) observó que muchas estrellas “fijas” parecían estar muy cerca unas de otras en el cielo, y determinó que la probabilidad de que estas proximidades fueran coincidencias era muy baja, sugiriendo la existencia de cúmulos y lo que él llamó estrellas “satélites” orbitando otras estrellas “fijas”. Propuso que, al medir los periodos y separaciones de estas estrellas, se podría determinar la relación de masas entre los componentes, ofreciendo una comprensión de la relación entre la masa y el brillo de las estrellas, algo desconocido en esa época.

A principios del siglo XIX, William Herschel desarrolló el término “estrella binaria” (Herschel 1802). Además, Herschel trazó las órbitas de varias binarias propuestas y verificó

que seguían las leyes de la gravitación de Newton, confirmando la existencia de estrellas binarias (Herschel 1803).

Actualmente, la formación y evolución de binarias estelares y subestelares sigue siendo un tema de investigación y debate. Aunque los modelos teóricos y las simulaciones de nubes de gas en colapso pueden replicar la función de masa inicial observada en la formación estelar, la frecuencia y características de las binarias estelares presentan un desafío más complejo. Los modelos teóricos y las simulaciones actuales muestran que existen varias posibilidades para la formación de binarias:

- Una posibilidad es la fragmentación temprana de una nube protoestelar antes de su colapso, formando dos o más agrupaciones cercanas (Fisher 2004). En este caso, la separación máxima de la binaria estaría relacionada con el tamaño inicial de la agrupación fragmentada. Además, las nubes de gas en regiones de formación estelar pueden tener subestructuras en forma de filamentos alargados que también pueden contribuir al nacimiento de binarias a gran separación (Kraus et al. 2011).
- Otra posibilidad es la fragmentación del disco de acreción que rodea al protoestrella central (Zhu et al. 2012). En este caso, el objeto compañero puede llegar a tener una masa similar a la de la protoestrella central y la separación máxima de la binaria estaría determinada por el tamaño del disco. Una vez iniciada la fragmentación, el compañero comenzaría a acumular material, creando un hueco en el disco y migrando hacia el interior, lo que resultaría en una binaria mucho más cercana.
- Un último escenario para la formación de binarias es la fisión de un núcleo protoestelar después de su colapso inicial, aunque es menos probable según las simulaciones hidrodinámicas (Tohline 2002).

Las observaciones muestran que alrededor del 50-60 % de las estrellas de masa solar se forman en sistemas binarios (Raghavan et al. 2010). La frecuencia es menor para estrellas de baja masa y enanas marrones, pero aún así, un porcentaje significativo de estrellas de tipo M, aproximadamente el 20-30 %, también forman parte de sistemas múltiples (Cortés-Contreras et al. 2017). Esta frecuencia es similar o incluso menor para estrellas de tipos espectrales M tardíos y posteriores (Fontanive et al. 2018).

En regiones de formación estelar como Tauro y Upper Scorpio, la frecuencia de binarias es notablemente alta. Por ejemplo, en Tauro, el 60 % de las estrellas T-Tauri forman sistemas binarios, una proporción cuatro veces mayor que en estrellas de la secuencia principal (Ghez et al. 1993). Estudios adicionales en otras regiones jóvenes confirman esta tendencia, sugiriendo que las interacciones gravitacionales tempranas juegan un papel crucial en la disrupción de sistemas múltiples.

1.3. Compañeros a gran separación

Los sistemas múltiples de orden superior, especialmente aquellos con compañeros a gran separación de sus estrellas principales, ofrecen una oportunidad muy interesante

para investigar la dinámica orbital y la estabilidad de los sistemas planetarios. Estos compañeros, que pueden ser enanas marrones o planetas masivos, proporcionan información valiosa sobre los procesos de dispersión y migración en discos protoplanetarios.

Reipurth & Mikkola (2012) presentaron un estudio en el que se muestra cómo las estrellas formadas en sistemas triples tienden a desarrollar binarias cercanas con un tercer componente en órbitas mucho más amplias debido a interacciones dinámicas. En sus simulaciones, los sistemas triples estables y ligados suelen tener separaciones de la binaria cercana entre 10 y 100 UA, mientras que el tercer componente puede orbitar a distancias de 1000 a 10.000 UA, e incluso hay sistemas con separaciones de hasta 100.000 UA.

Estos sistemas de binarias a gran separación necesitan un tiempo considerable para alcanzar la mitad del período orbital por primera vez, ya que puede durar entre decenas y cientos de millones de años. Durante este período la probabilidad de que sufran perturbaciones externas es muy alta, pero la existencia de binarias muy separadas observadas en el campo estelar indica que la influencia de otros cuerpos puede haber sido mínima durante la evolución temprana del sistema. Por esta razón, estos sistemas son tan importantes para restringir la densidades estelares de la región donde se formaron, y también por dónde se han ido desplazando posteriormente.

La frecuencia de sistemas binarios es particularmente alta en asociaciones jóvenes y regiones de formación estelar como Tauro y Upper Scorpio. Ghez et al. (1993) reportó una frecuencia de binarias del $60 \pm 17\%$ entre estrellas T-Tauri en Tauro y Ofioco, una tasa cuatro veces mayor que en estrellas de la secuencia principal. Sin embargo, los compañeros subestelares a gran separación, aunque relativamente poco frecuentes (1-5%) (Bowler et al. 2015), son fundamentales para probar los modelos teóricos de evolución subestelar y, además, los estudios de multiplicidad son esenciales para comprender la formación estelar y los procesos de evolución dinámica.

1.4. Young Moving Groups

Los grupos de movimiento jóvenes, YMGs de ahora en adelante por sus siglas en inglés (*Young Moving Groups*) son asociaciones de estrellas jóvenes que comparten movimientos comunes a través del espacio.

La idea de los grupos de cinemática común fue propuesta por primera vez por Eggen (1961), que postuló que las estrellas que comparten características cinemáticas similares, como velocidades y trayectorias en el espacio, podrían haberse formado juntas en el mismo lugar y tiempo. Este concepto fue fundamental para entender la estructura y evolución de la Vía Láctea, así como para identificar poblaciones estelares coherentes dentro de nuestra galaxia.

Posteriormente, estudios como el de Montes et al. (2001) ampliaron este concepto al identificar y catalogar grupos estelares con características físicas y cinemáticas similares en nuestra vecindad solar. Estos grupos, como AB Doradus o el Grupo de las Híades, entre otros, se convirtieron en referencias importantes para el estudio de la formación

estelar y la dinámica galáctica.

Más recientemente, otras investigaciones han explorado estrellas jóvenes en la vecindad solar y en grupos en movimiento jóvenes (YMGs). Los YMGs se forman principalmente debido a procesos dinámicos y evolutivos dentro de nuestra galaxia. Algunas teorías incluyen:

- **Evaporación de asociaciones estelares:** a medida que las asociaciones estelares envejecen, las interacciones gravitatorias con otras estrellas y estructuras galácticas pueden dispersar sus miembros, lo que puede resultar en la formación de YMGs, donde las estrellas mantienen una cinemática similar debido a su origen común.
- **Dinámica del disco de la galaxia:** la rotación diferencial del disco y la interacción con brazos espirales y perturbaciones gravitatorias, puede llevar a la formación de agrupaciones estelares a lo largo del tiempo.
- **Procesos de formación estelar en nubes moleculares:** los procesos de formación estelar en estas nubes pueden dar lugar a la creación de grupos estelares jóvenes con propiedades físicas y cinemáticas similares.

Estos YMGs, que suelen tener edades inferiores 200 millones de años, son entornos ideales para estudiar la formación y evolución temprana de sistemas planetarios y subestelares (Torres et al. 2000). La identificación de objetos subestelares jóvenes es una de las principales contribuciones de los YMGs al estudio astronómico (Zuckerman & Song 2004). Estos objetos, caracterizados por su luminosidad y propiedades espectrales que aún reflejan su formación reciente, ofrecen valiosa información sobre los procesos de formación estelar y la evolución de sistemas planetarios.

Además de la búsqueda de compañeros subestelares, se han realizado estudios que revelan diferencias significativas en la frecuencia de multiplicidad entre regiones jóvenes y maduras. Por ejemplo, se ha observado que la tasa de multiplicidad en los YMGs es considerablemente mayor que en estrellas de campo (Leinert et al. 1993). Estudios más recientes, como el de Zúñiga-Fernández et al. (2021), indican una dependencia con la edad en la frecuencia de binarias espectroscópicas (SB), mostrando una fracción del 20-30 % en asociaciones jóvenes como ϵ Cha, β Pictoris y TW Hydrae, y menos del 10 % en asociaciones más antiguas (35-125 Myr).

Los estudios de frecuencias de compañeros a gran separación también parecen indicar estas dependencias con la edad (Chinchilla 2021). Estas diferencias en la frecuencia de compañeros a gran separación entre regiones jóvenes y maduras pueden atribuirse a factores como la disrupción dinámica provocada por interacciones con otros cuerpos estelares y el ambiente galáctico. Además, las condiciones iniciales durante la formación estelar podrían desempeñar un papel crucial en la formación y estabilidad de estos sistemas a gran separación.

La existencia de numerosas estrellas miembros de YMGs como AB Doradus, β Pictoris, TW Hydra o Tucana-Horologium ha sido bien documentada. La distribución de los miembros de estos grupos en el cielo se muestra en la Figura 1.2.

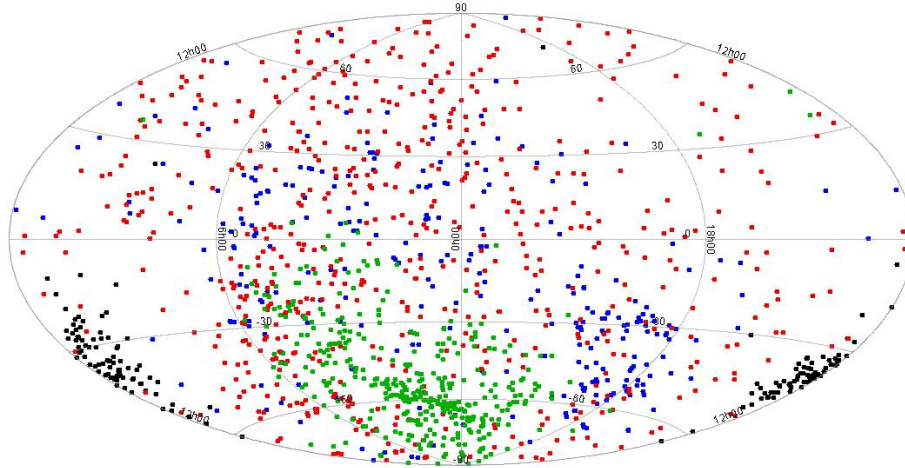


Figura 1.2: Ubicación en el cielo de los miembros de TW Hydrae (negro), Beta Pictoris (azul), AB Doradus (rojo) y Tucana Horologium (verde).

Estudios recientes con el satélite GAIA han identificado miles de estrellas pertenecientes a estos grupos y otros ya conocidos (Faherty et al. (2018), Gagné & Faherty (2018), Chinchilla (2021)) y además han revelado nuevos grupos previamente desconocidos, como Volans-Carina (Gagné et al. 2018) y Oceanus (Gagné et al. 2023). En la Tabla 1.1 se presenta una lista de los YMGs considerados en este trabajo (en el Capítulo 3 se explicará la selección de estos YMGs) y de los cuales se llevará a cabo una búsqueda de compañeros a gran separación.

ID	Nombre	Dist (pc)	Edad (Myr)
TWA	TW Hydrae	60 ± 10	10 ± 3
32ORI	32 Orionis	96 ± 2	22^{+4}_{-3}
β PMG	β Pictoris	30^{+20}_{-10}	24 ± 3
COL	Columba	50 ± 20	42^{+6}_{-4}
THA	Tucana-Horologium	46^{+8}_{-6}	45 ± 4
CAR	Carina	60 ± 20	45^{+11}_{-7}
VCA	Volans-Carina	86 ± 5	89^{+5}_{-7}
ABDMG	AB Doradus	30^{+20}_{-10}	149^{+51}_{-19}
CARN	Carina-Near	30 ± 20	~ 200
OCE	Oceanus	2 - 50	~ 500

Tabla 1.1: Distancias y edades de los Young Moving Groups seleccionados. Los datos de esta tabla han sido extraídos de Gagné & Faherty (2018), Gagné et al. (2018) y Gagné et al. (2023)

1.5. Misión GAIA y Data Release 3

La misión GAIA de la Agencia Espacial Europea (ESA) está proporcionando datos sin precedentes sobre posiciones, distancias y movimientos propios de más de mil millones de estrellas en nuestra galaxia. Con el *Data Release 3* (DR3), GAIA ha extendido su catálogo para incluir una mayor cantidad de objetos subestelares, mejorando nuestra capacidad para detectar y estudiar estos cuerpos en detalle (van Leeuwen et al. 2022).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Una de las contribuciones más importantes de GAIA DR3 es la medición de los movimientos propios de las estrellas, proyectados a lo largo de las coordenadas galácticas, μ_l y μ_b . Estas mediciones son cruciales para detectar desviaciones relacionadas con la rotación galáctica (van Leeuwen et al. 2022). En la Figura 1.3, se muestra el cálculo de la mediana de los movimientos propios, proporcionando una visión detallada de los patrones cinemáticos en diferentes regiones del cielo.

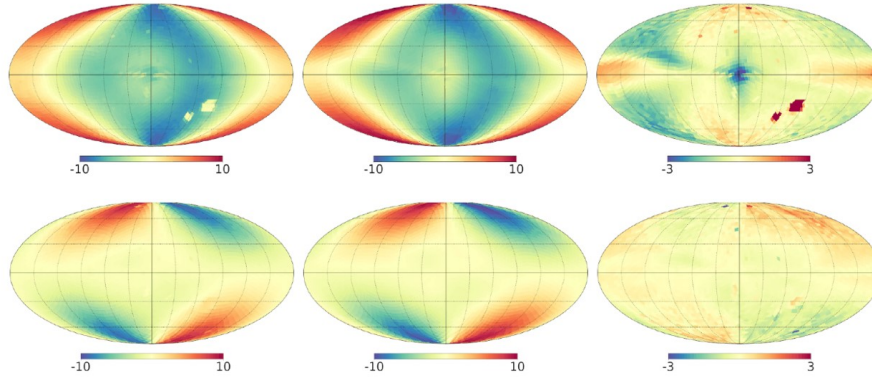


Figura 1.3: Mediana de los movimientos propios μ_l (paneles superiores) y μ_b (paneles inferiores) en mas/yr para GAIA DR3 (izquierda), GOG20 (centro) y sus diferencias absolutas (derecha) en los píxeles HEALPix, en el rango de magnitud $17 < G < 18$. Credit: <https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/>

La gran cantidad de datos proporcionada por GAIA DR3 también ha tenido un impacto significativo en el estudio de sistemas binarios, tanto estelares como subestelares. Anteriormente, la detección y caracterización de estos sistemas dependía de observaciones limitadas y técnicas indirectas, pero GAIA ha proporcionado mediciones precisas de paralaje y movimientos propios, lo que permite identificar sistemas binarios con mayor exactitud y en un rango de distancias mucho más amplio (van Leeuwen et al. 2022).

Los datos de GAIA DR3 son especialmente valiosos para el estudio de compañeros a gran separación. Estos compañeros, que pueden ser enanas marrones o planetas masivos, a menudo se encuentran a distancias tan grandes de sus estrellas anfitrionas que son difíciles de detectar con métodos convencionales. Sin embargo, las precisas mediciones de movimiento propio y paralaje de GAIA permiten identificar estos objetos con mayor fiabilidad.

En definitiva, los datos de GAIA son cruciales para trazar mapas tridimensionales precisos de la distribución de estrellas y objetos subestelares, así como para estudiar su dinámica y evolución.

Capítulo 2

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es identificar estrellas jóvenes cercanas en varios grupos de movimiento jóvenes (YMGs) y estudiar la dependencia de la frecuencia de compañeros a gran separación con la edad. Para lograr este objetivo, se llevarán a cabo las siguientes metas específicas:

- **Recopilación y caracterización de estrellas jóvenes y cercanas** (<1 Gyr y <100 pc) pertenecientes a diferentes YMGs, caracterización de las propiedades astrométricas y cinemáticas de los candidatos a miembros de estos grupos utilizando los datos de GAIA DR3 y selección de miembros verdaderos basándonos en estas características.
- **Búsqueda de compañeros estelares y subestelares** a gran separación (50-10.000 UA), a través de la identificación de objetos con distancia y movimiento propio común a los miembros de cada YMG y el análisis de separaciones angulares.
- **Estudio de la frecuencia de compañeros y su dependencia con la edad** mediante la determinación de la frecuencia de compañeros a gran separación, la investigación de la dependencia de esta frecuencia con la edad de los YMGs y el análisis de la abundancia de compañeros de baja masa a edades tempranas, para comprobar si los procesos de evolución dinámica pueden producir la disrupción de estos sistemas con la edad.

Con los resultados de este trabajo se podrá crear un listado completo de estrellas jóvenes en la vecindad solar, que se utilizará para la búsqueda de compañeros cercanos con misiones futuras como Euclid y mediante óptica adaptativa. Además, permitirá identificar sistemas binarios emblemáticos que servirán de referencia para los modelos de evolución estelar, así como investigar los procesos de formación y evolución dinámica de sistemas múltiples, fundamentales para entender los entornos en que se formaron estas estrellas.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Selección de Young Moving Groups

En este capítulo, presentaremos una búsqueda de compañeros subestelares a gran separación en diez grupos de movimiento jóvenes (YMGs), ya introducidos en la Tabla 1.1 del Capítulo 1, y de los que se hará una breve descripción. Estos YMGs han sido seleccionados por varias razones:

- En primer lugar, la mayoría tienen numerosos miembros (>100), lo que aumentará nuestra muestra en la búsqueda de compañeros.
- Están a una distancia cercana (<100 pc), lo que nos permite encontrar miembros de muy baja masa dentro de los límites fotométricos de GAIA.
- Al estar a una distancia cercana, los miembros tendrán movimientos propios relativamente altos, por lo que seremos capaces de hacer una búsqueda de compañeros con datos astrométricos.
- Tienen edades diferentes que varían entre 10 y 500 Myr, lo que nos permitirá comparar nuestros resultados con las diferentes etapas de su evolución.

3.1.1. TW Hydrae

El grupo de TW Hydrae (TWA) fue descubierto entre finales de los años 90 y principios de los 2000 por múltiples equipos de astrónomos, aunque Kastner et al. (1997) son los primeros que describen el grupo de TW Hydrae como una asociación de estrellas jóvenes cercanas. En un primer momento, determinaron una edad de unos 20 Myr para ellas, pero la estimación de edad más reciente de Bell et al. (2015) obtiene un valor de 10 Myr aproximadamente.

Actualmente, se han identificado alrededor de dos centenares de miembros candidatos de TWA y su distancia media es de 60 ± 10 pc (Gagné & Faherty 2018). Además, este YMG es particularmente interesante porque alberga la estrella TW Hydrae, una joven estrella T-Tauri rodeada de un disco protoplanetario, lo que la convierte en un laboratorio natural para estudiar la formación de planetas. Cabe destacar que el objeto 2M1207b,

miembro de TWA, fue el primer compañero de masa planetaria detectado por imagen directa (Chauvin et al. 2004).

3.1.2. β Pictoris

Identificado por Zuckerman et al. (2001a), el YMG de β Pictoris (β PMG) debe su nombre a la estrella más prominente del grupo es β Pictoris, famosa por su disco protoplanetario y la evidencia directa de formación planetaria, incluyendo dos exoplanetas ya confirmados (Lagrange et al. 2009).

En primer lugar, Zuckerman et al. (2001a) calcularon para β PMG una edad estimada de 12 Myr a partir de la ubicación de sus miembros en el diagrama HR. Muchos estudios posteriores han intentado determinar la edad de este YMG, pero Bell et al. (2015) estimaron una edad de unos 24 Myr a partir del ajuste de isocronas de modelos pre-secuencia principal. β PMG tiene más de 300 miembros identificados situados a una distancia media de 30^{+20}_{-10} pc (Gagné & Faherty 2018).

3.1.3. AB Doradus

Propuesto por primera vez por Zuckerman et al. (2004), el YMG AB Doradus (ABDMG) fue nombrado en honor a la estrella joven AB Doradus, y se encuentra a una distancia de aproximadamente 30^{+20}_{-10} pc de nuestro Sol (Gagné & Faherty 2018). Aunque al principio se identificaron unos 30 candidatos jóvenes que se movían en la misma dirección que la estrella, actualmente se han identificado alrededor de 700 miembros y candidatos a miembros ampliamente distribuidos por el cielo.

En el artículo de su descubrimiento (Zuckerman et al. 2004), se propuso que su edad era de unos 50 Myr. Sin embargo, Luhman et al. (2005) determinaron que tanto la estrella como el grupo ABDMG eran más antiguos y aproximadamente coetáneos con las Pléyades (100–125 Myr). Finalmente, Bell et al. (2015) obtuvo una edad de unos 150 Myr, basándose en el ajuste de isocronas de modelos pre-secuencia principal.

3.1.4. 32 Orionis

El grupo 32 Orionis (32ORI) fue identificado como un YMG en el trabajo de Mamajek (2007), que identificó varios miembros potenciales basándose en sus movimientos propios y sus posiciones en el diagrama HR. Actualmente se han identificado más de 50 miembros y candidatos a miembros.

Aunque inicialmente no se proporciona ninguna estimación de su edad, posteriores estudios, como el realizado por Bell et al. (2017), han estimado la edad de esta asociación en aproximadamente 22 Myr. La distancia de 32ORI, unos 96 ± 2 pc (Gagné & Faherty 2018), lo hace el YMG más alejado considerado en este trabajo.

3.1.5. Oceanus

Gagné et al. (2023), utilizando datos de Gaia DR3, reportaron el descubrimiento del

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

grupo de movimiento Oceanus (OCEMG), un grupo de aproximadamente 500 Myr con miembros y candidatos a distancias de 2 a 50 parsecs. Este nuevo grupo es particularmente interesante porque incluye la enana marrón más cercana al Sol, Luhman 16AB, a una distancia de 2 parsecs, y es uno de los mejores puntos de referencia subestelares conocidos hasta la fecha.

Además, OCEMG es uno de los YMGs más cercanos, lo que lo convierte en un valioso laboratorio para el estudio de miembros subestelares, con ocho candidatos a enanas marrones identificados.

En la Figura 3.1 se representa la distribución en el cielo de los miembros de los YMGs encontrados más recientemente.

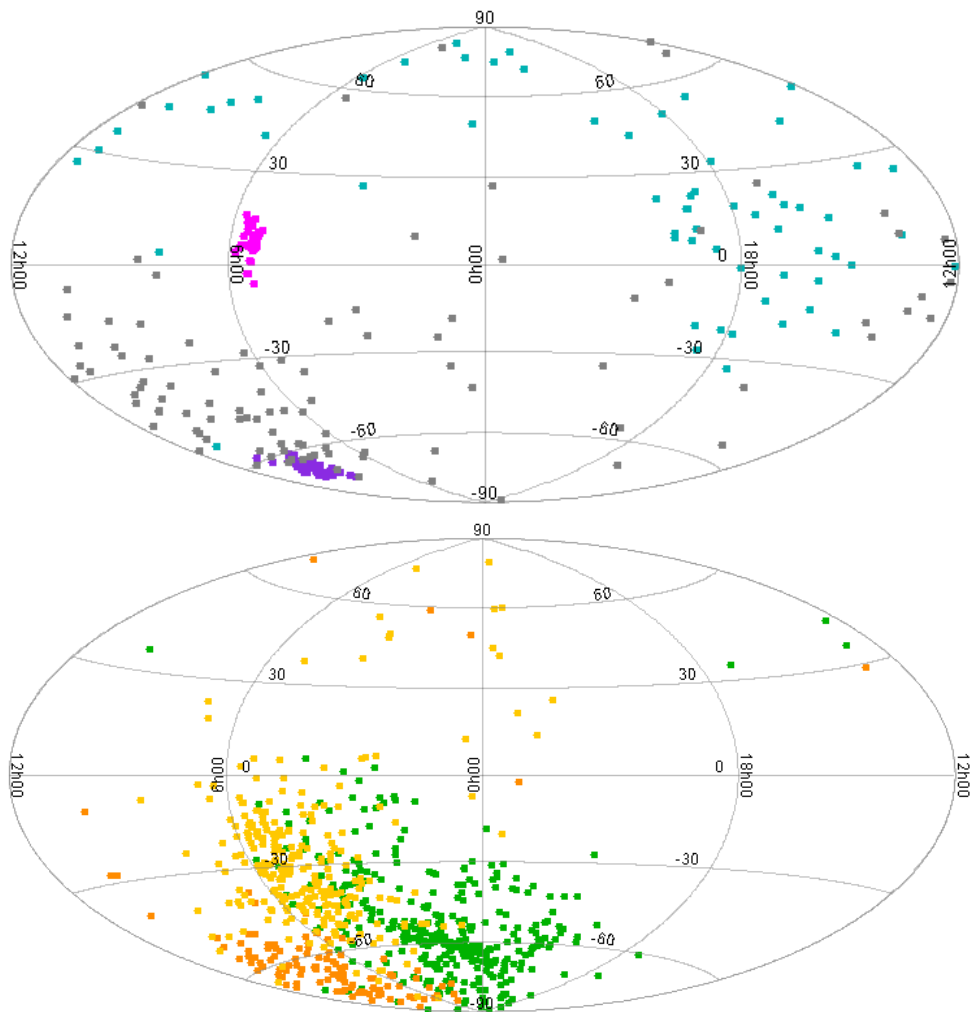


Figura 3.1: Ubicación en el cielo de los miembros de 32 Orionis (fucsia), Oceanus (verde agua), Volans-Carina (violeta) y Carina-Near (gris), y Tucana-Horologium (verde), Carina (naranja) y Columba (amarillo).

3.1.6. Tucana-Horologium

El YMG Tucana-Horologium (THA) está formado por dos grupos móviles previamente identificados como el grupo móvil “Tucanae”, descubierto por Zuckerman & Webb (2000), y el grupo móvil Horologium, identificado por Torres et al. (2000). Posteriormente,

te, Zuckerman et al. (2001b) señalaron que ambos grupos estaban asociados físicamente, ya que compartían movimientos similares, edad y distancia.

Con una edad estimada de 45 Myr (Bell et al. 2015), THA es una agrupación de estrellas jóvenes que se extiende a través de las constelaciones de Tucana y Horologium. Hasta ahora, se han identificado más de 400 miembros y candidatos a miembros, ubicados a una distancia media de 46 parsecs (Gagné & Faherty 2018).

3.1.7. Carina

El YMG Carina (CAR) es una asociación estelar situada en las cercanías de la constelación de Carina, cuya identificación inicial y características básicas fueron discutidas por Zuckerman et al. (2004). Se encuentra en una región rica en formación estelar y su composición incluye estrellas jóvenes de diversos tipos espectrales.

La edad de este grupo ha sido objeto de varias estimaciones, pero Bell et al. (2015) han propuesto una edad de aproximadamente 45 Myr basada en el ajuste de isocronas de modelos pre-secuencia principal.

3.1.8. Carina-Near

Zuckerman & Song (2004) proporcionaron las primeras evidencias de la existencia del grupo Carina-Near (CARN). En este estudio inicial, destacaron varias estrellas en la constelación de Carina que compartían movimientos y características físicas similares, lo que sugería una asociación física.

Este grupo ha sido objeto de estudios posteriores para caracterizar su composición estelar y determinar su edad con mayor precisión. Por ejemplo, Malo et al. (2013) realizaron un análisis bayesiano para identificar nuevos candidatos estelares en grupos cinemáticos jóvenes cercanos, incluyendo CARN, y proporcionaron una estimación de edad de 200-300 Myr, lo que sitúa a este grupo en una categoría de edad intermedia dentro de los YMGs. Posteriormente, Gagné & Faherty (2018) utilizaron una estimación de edad de 200 Myr.

3.1.9. Volans-Carina

El grupo de movimiento Volans-Carina (VCA) fue identificado por Gagné et al. (2018). En este estudio se utilizaron datos del satélite GAIA para identificar estrellas con movimientos comunes y características físicas consistentes en las constelaciones de Volans y Carina, estableciendo así la existencia de esta asociación estelar.

Además, Gagné et al. (2018) proporcionaron una caracterización inicial de la composición estelar y la cinemática de VCA, y definieron una distancia aproximada de 85 parsecs y una edad de alrededor de 30 Myr.

3.1.10. Columba

El YMG Columba (COL) fue inicialmente considerado parte de la Gran Asociación Joven Austral (Great Austral Young Association, GAYA), junto con otros grupos cercanos como Tucana-Horologium y Carina. Posteriormente, el trabajo de Torres et al. (2008), identificó COL como un YMG independiente.

Con una edad estimada de 42 Myr, actualmente se han identificado más de 300 miembros y candidatos a miembros ubicados a una distancia media de 50 parsecs (Gagné & Faherty 2018).

3.2. Búsqueda de compañeros

El presente estudio busca identificar estrellas jóvenes cercanas y analizar la frecuencia y características de sus compañeros a gran separación. Para lograr esto, se han seguido varias etapas metodológicas detalladas a continuación:

3.2.1. Recopilación de datos y filtrado de miembros

Se recopilaron los miembros y candidatos a miembro de cada Young Moving Group (YMG) utilizando la base de datos Simbad. Empleando la herramienta TOPCAT, estos miembros se correlaron (dentro de un radio de 1 segundo de arco) con los catálogos de GAIA DR3 y 2MASS, para obtener sus parámetros astrométricos y fotométricos.

Aunque hemos realizado la búsqueda entre todos los miembros y candidatos a miembros, en la memoria final y para efectos de estadística, se decidió considerar solamente los miembros y candidatos a miembros con una probabilidad de membresía $\geq 68\%$. Esta elección se debe a que, en estadística, el nivel de confianza del 68% corresponde aproximadamente a una desviación estándar (1σ) en una distribución normal.

3.2.2. Búsqueda de compañeros

Se desarrolló un código en Python que utiliza el *query* TAP (Table Access Protocol) de GAIA DR3 para automatizar la búsqueda y filtrado de posibles compañeros, tanto estelares como subestelares, de cada miembro de los YMGs. Este código permite descargar todas las entradas de GAIA dentro de un radio para cada uno de los miembros y posteriormente, seleccionar los objetos cuyo diferencia de paralaje y movimiento propio con respecto a cada miembro esta dentro de los criterios de búsqueda que se detallaran más adelante.

Para asegurarnos una búsqueda de compañeros hasta mínimo 10.000 UA de cada miembro, se seleccionó un radio de búsqueda de 0,27 grados (~ 1.000 arcsec) de separación para los grupos de movimiento TW Hydrae (TWA), 32 Orionis (32ORI), Volans-Carina (VCA), Carina (CAR) y Columba (COL), mientras que para los grupos β Pictoris (β PMG), Tucana-Horologium (THA) y Carina-Near (CARN), se seleccionó un radio de búsqueda de 0,3 grados.

Para AB Doradus (ABDMG) se hizo una búsqueda de 0,3 grados, aunque para los miembros más cercanos se amplió a 0,4 grados, para asegurarnos llegar a esas 10.000 UA.

Por otro lado, en el grupo de movimiento Oceanus (OCE), se hizo una búsqueda de 0,3 grados excepto para el objeto Luhman 16AB, demasiado cercano (2 parsecs) para realizar este tipo de búsqueda, y para el que se hizo una búsqueda específica, y para el objeto YZ Cmi, cuya búsqueda de compañeros se amplió a 0,5 grados.

Aunque la barra de error de GAIA muy pequeña (<0.5 mas y <0.1 mas/yr), decidimos ser conservadores y considerar diferencias de más de 10σ , por lo que inicialmente se establecieron los siguientes criterios de búsqueda:

- La diferencia de paralaje de los compañeros encontrados respecto al miembro debía ser menor de 5 mas.
- La diferencia de movimiento propio de los compañeros encontrados respecto al miembro debía ser menor a 10 milisegundos de arco por año (mas/yr).

En las Figuras 3.2 y 3.3, se pueden observar ejemplos de esta búsqueda con los criterios iniciales descritos.

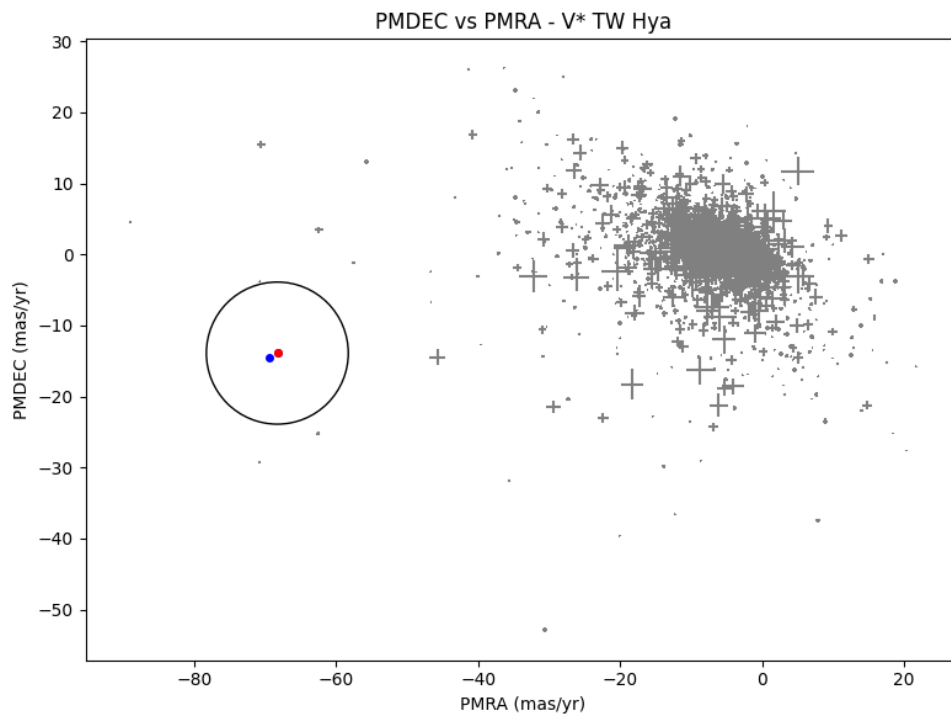


Figura 3.2: En este gráfico se muestra el movimiento propio en declinación frente a movimiento propio en ascensión recta, del objeto V* TW Hya (rojo) y su compañero TWA 28 (azul), pertenecientes al grupo de movimiento TW Hydrae. El círculo negro delimita la diferencia de 10 mas/yr. Se observa claramente el alto movimiento propio de los compañeros miembros frente a los objetos de fondo no miembros (gris), que se sitúan alrededor del 0.

3.2.3. Ajuste de los criterios de búsqueda

Como puede verse en la Figura 3.3, se observó una concentración mayor de compañeros a menos de 2-4 mas de paralaje y 6-8 mas/yr de movimiento propio. En estos

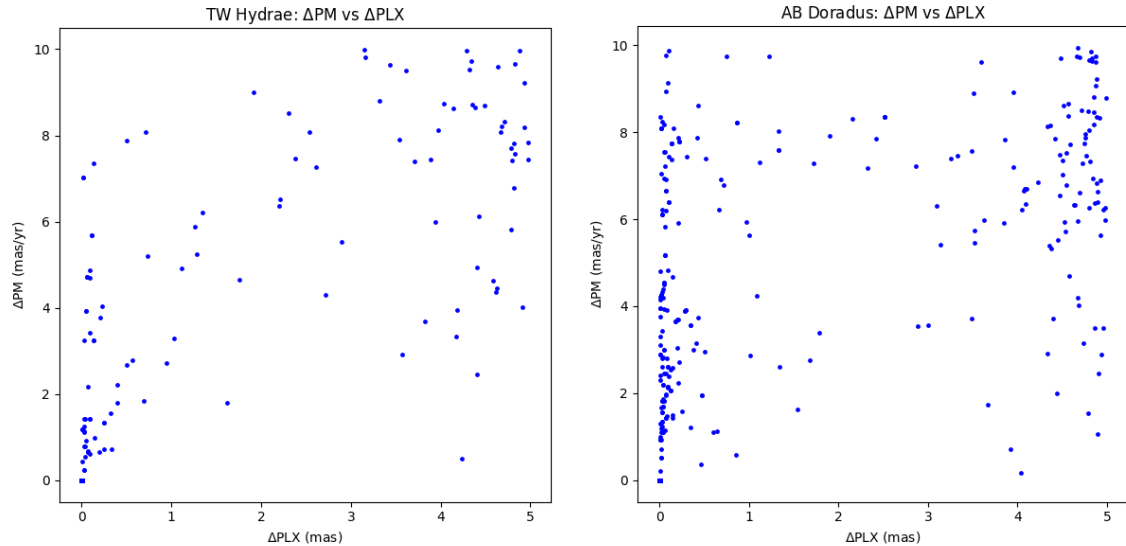


Figura 3.3: En este gráfico se muestra la diferencia de movimiento propio frente a la diferencia de paralaje respecto a los miembros, de los compañeros encontrados par a los miembros de los grupos de movimiento TW Hydrae (izquierda) y AB Doradus (derecha). El objetivo de este gráfico es mostrar los compañeros encontrados dentro de los límites iniciales de búsqueda.

rangos, la cantidad de compañeros va disminuyendo y, a partir de aproximadamente 4 mas de paralaje y 8 mas/yr de movimiento propio, se observa un aumento de compañeros que parecen ser contaminantes. Por esta razón, se decidió hacer una selección mas restrictiva, ya que estos criterios iniciales eran muy amplios en diferencia de paralaje y movimiento propio, y que entre los compañeros aún quedaban muchos contaminantes. Los criterios de búsqueda se ajustaron a lo siguiente:

- La diferencia de paralaje de los compañeros encontrados respecto al miembro se redujo a 4 mas.
- La diferencia de movimiento propio de los compañeros encontrados respecto al miembro se redujo a 8 mas/yr.

Las tablas de datos de los miembros y los compañeros encontrados para cada YMG, se encuentran en el Apéndice A.

3.2.4. Búsqueda de compañeros “orbitales”

Al analizar los compañeros resultantes, se observó que algunos objetos más cercanos y conocidos en la literatura, habían sido descartados por tener una diferencia de movimiento propio mayor a la de los límites establecidos. Esta diferencia se explicaría por el movimiento orbital relativo entre ambos compañeros.

Para recuperar estos posibles compañeros, se decidió hacer una segunda búsqueda similar a la anterior, pero con diferentes parámetros:

- La búsqueda de compañeros se limitó a una separación de 20 segundos de arco, que equivale a una separación física de al menos 200 UA para las estrellas más cerca-

nas (~ 10 parsecs), y garantiza que estamos teniendo en cuenta todos los posibles compañeros con velocidad orbital significativa respecto a sus primarias.

- Se mantuvo el criterio de distancia común, pero se eliminó el límite de movimiento propio, para poder identificar compañeros con comportamiento orbital que habían sido descartados en la primera búsqueda.

Las tablas de datos de los miembros y los compañeros encontrados para cada YMG, se encuentran en el Apéndice A, e incluyen las coordenadas, paralaje, movimientos propios, velocidades radiales, separación angular y física de los compañeros, y magnitudes fotométricas en G (GAIA) y J (2MASS).

3.3. Cálculo de masas con modelos de GAIA

Empleando modelos teóricos de isocronas del grupo de Lyon (Baraffe et al. 2015), que proporcionan fotometría en las bandas de GAIA, pudimos estimar las masas aproximadas de los miembros de cada YMG y de sus compañeros basándonos en sus magnitudes y la edad del YMG.

Para ello, se creó un código en Python donde se cargaron los modelos de isocronas y, utilizando la edad conocida de cada YMG (Gagné & Faherty 2018) y la magnitud en el filtro G de GAIA para cada objeto, se realizó una interpolación lineal que estimara las masas de cada objeto basándose en sus magnitudes absolutas G. En la Figura 3.4 se puede observar el cálculo de masas respecto a la magnitud G en el grupo TWA.

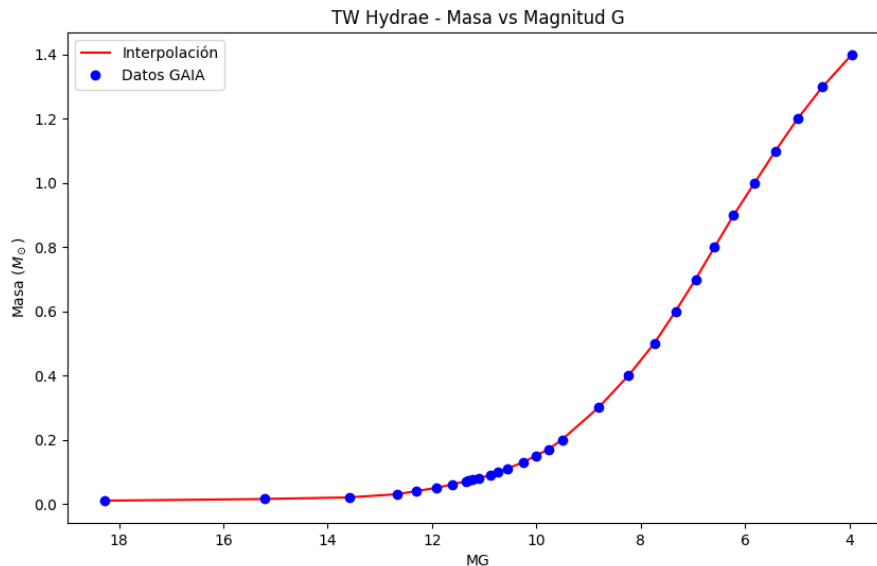


Figura 3.4: Gráfico que muestra la relación entre la magnitud absoluta G y la masa estelar en TWA. Se observan tanto los datos de los modelos de isocronas de GAIA (puntos azules) como los valores interpolados (línea roja).

Las tablas de datos con las masas calculadas, tanto de los miembros como los compañeros encontrados para cada YMG, se encuentran en el Apéndice A.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Resultados generales

En este capítulo, presentaremos los resultados obtenidos en este trabajo así como una discusión de los mismos. Estudiaremos la completitud de nuestra búsqueda, así como los criterios astrométricos y fotométricos utilizados para eliminar contaminantes que interfieran con las estadísticas. Además, presentaremos varios casos, tanto de sistemas conocidos como de compañeros encontrados en el presente trabajo, que resultan interesantes como sistemas de referencia y para su seguimiento posterior.

En general, de los más de 2.500 candidatos a objetos jóvenes en los Young Moving Groups (YMGs) que hemos recopilado en este trabajo, hemos realizado una búsqueda de compañeros alrededor de 1.713 de ellos, es decir, aquellos con una probabilidad de ser miembros $\geq 68\%$. En total, como puede verse en la Tabla 4.1, hemos encontrado un total de 471 candidatos a compañeros en 352 sistemas, de los cuales 86 son candidatos subestelares ($\leq 0,072M_{\odot}$). Además, 289 de los candidatos encontrados no están catalogados como compañeros y 144 de ellos son objetos no conocidos y encontrados por primera vez en el presente trabajo. Los criterios de la búsqueda de compañeros están detallados en el Capítulo 3.

4.2. Completitud y contaminantes

En esta sección discutiremos sobre la completitud de la búsqueda de compañeros y sobre los contaminantes de la misma, los cuales vienen dados por los límites astrométricos y fotométricos de GAIA, así como por los criterios aplicados para realizar la búsqueda.

4.2.1. Completitud

El poder de resolución del instrumento Gaia para dos fuentes cercanas en el cielo depende principalmente de la separación angular y la diferencia de magnitudes (de Bruijne et al. 2015) y se denomina “sensibilidad al contraste”. En regiones densas, se pierde una cantidad significativa de fuentes tenues debido a este efecto, lo que afecta directamente nuestra capacidad para resolver sistemas binarios (Rybizki et al. 2020).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

YMG	Candidatos a miembros	Num miembros (>68 %)	Sistemas	Candidatos a compañeros	Candidatos subestelares	Compañeros nuevos	Nuevos no conocidos
TWA	193	101	23	32	15	17	11
32ORI	55	55	21	36	9	33	20
β PMG	397	254	54	65	11	33	8
COL	305	225	65	107	23	83	54
THA	463	302	37	43	5	22	10
CAR	137	112	19	32	7	29	15
VCA	66	66	12	19	2	18	7
ABDMG	715	443	94	109	10	43	19
CARN	115	84	14	14	1	5	0
OCE	89	71	13	14	3	6	0
Totales	2.535	1.713	352	471	86	289	144

Tabla 4.1: En esta tabla se presenta una recopilación de los Young Moving Groups (YMGs) considerados en este trabajo, el recuento de miembros y candidatos a miembros de cada uno de ellos que se obtuvieron inicialmente y la cantidad de ellos que fueron seleccionados para la búsqueda de compañeros (aquellos con probabilidad de ser miembro $\geq 68\%$). También se muestra la cantidad inicial de miembros de los que se encontraron candidatos a compañeros y su número.

(*) : con los criterios de búsqueda ajustados que se han detallado en el Capítulo 3.

Los límites de completitud de GAIA varían según la dirección en el cielo, debido a factores como los cortes de distancia y la separación de fuentes. En la Figura 4.1 se observa que la separación angular mínima a la que resuelve GAIA varía entre 0.5 y 3 segundos de arco, en función de la diferencia de magnitud entre las fuentes, por lo que nuestra búsqueda de compañeros está limitada a separaciones angulares mayores que 0.5 segundos de arco y no es completa hasta separaciones mayores que 3 segundos de arco.

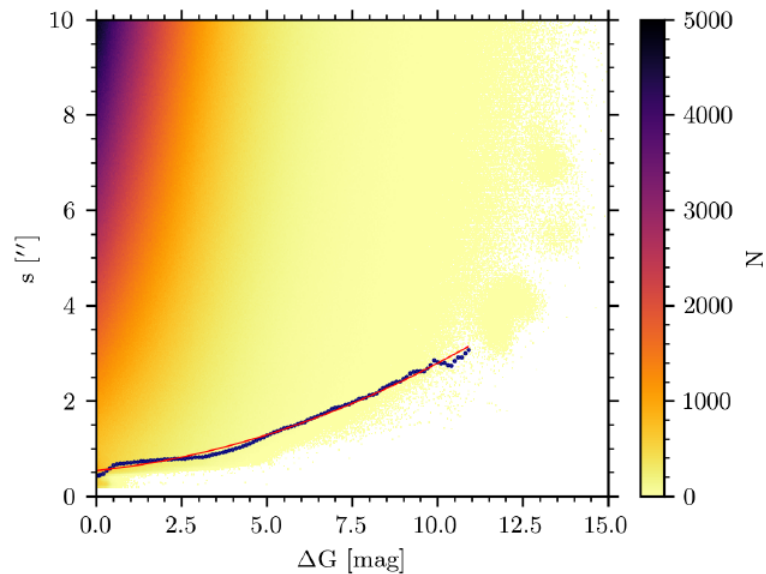


Figura 4.1: Representación de la separación angular de las entradas en el catálogo GAIA EDR3 en función de la diferencia de magnitud. Los colores representan la densidad de objetos según la escala que está a la derecha del gráfico. Este gráfico permite observar el límite de separación angular entre las fuentes en función de la diferencia de magnitud y la densidad de fuentes. *Credit: Gaia Collaboration et al. (2021)*

Otro factor clave que afecta la completitud es la magnitud aparente de una fuente, ya que puede causar errores significativos en el cálculo del paralaje y el movimiento propio. En Gaia Collaboration et al. (2021) se analiza la distribución de magnitudes G en Gaia EDR3, y se observa un límite superior para las magnitudes más brillantes que $G < 3$ mag y un límite inferior para las magnitudes más débiles que $G < 20,41$ mag.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Para comprobar si nuestra búsqueda es completa en magnitud, se han pintado diagramas de Magnitud absoluta en G frente a G-J de cada YMG con la magnitud límite de GAIA de 20.41 magnitudes, trasladada a magnitud absoluta adoptando la distancia promedio de cada YMG.

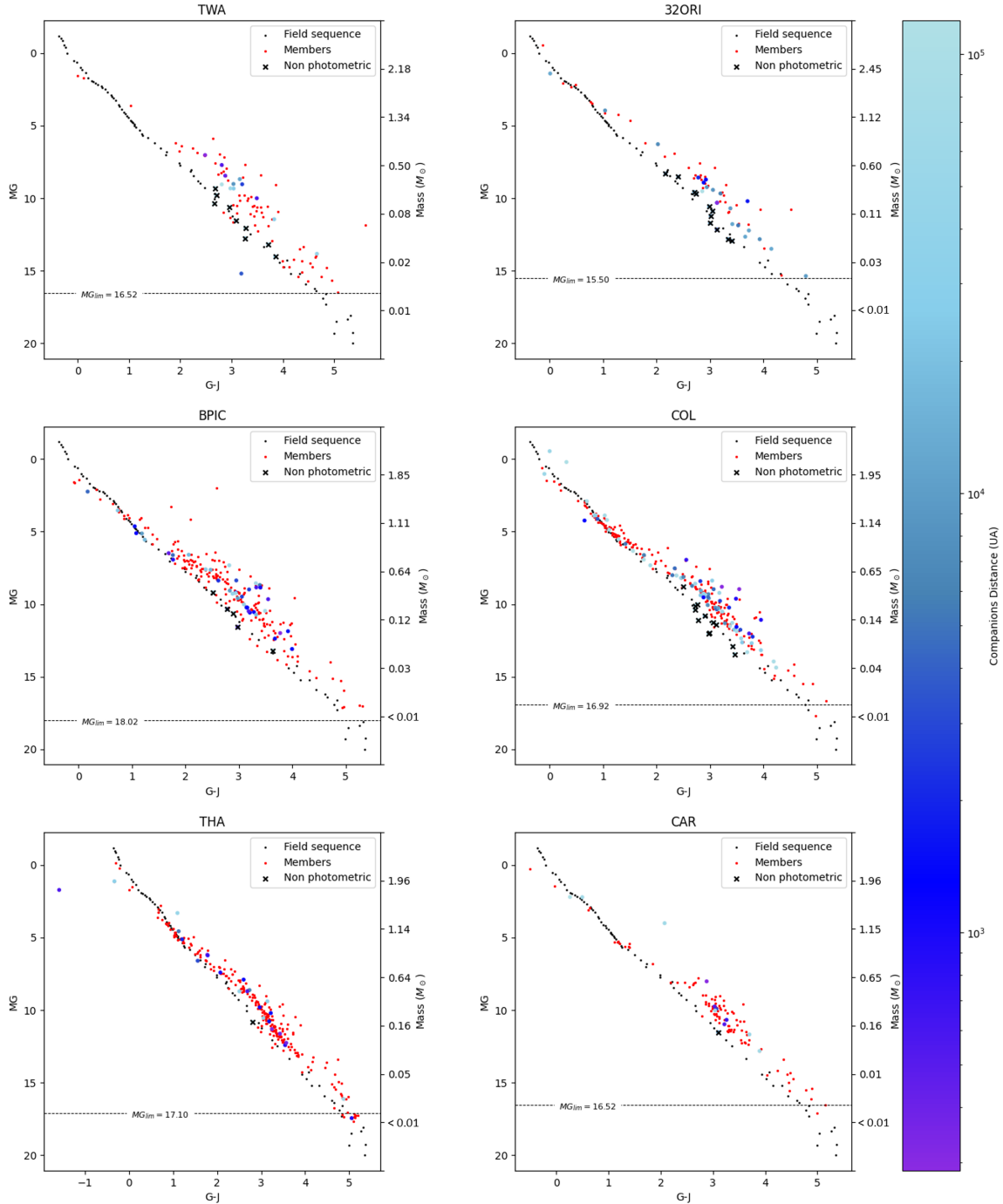


Figura 4.2: Diagramas de Magnitud absoluta en G frente a G-J de los miembros de cada YMG (rojo) y los compañeros encontrados en nuestra búsqueda (gradiente violeta-azul), comparados con la secuencia de objetos del campo dada por Picaud & Mamajek (2013).

Los compañeros se muestran en un gradiente de violeta a azul claro, en función de su distancia al miembro del YMG. Los compañeros que, una vez analizados, se han clasificado como fotométricamente malos se representan con una “X” encima.

Se representa un tercer eje a la derecha de cada diagrama que informa de las masas de los objetos en M_{\odot} .

El valor MG_{lim} , representa el límite de magnitud de GAIA en el extremo tenue para cada YMG.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

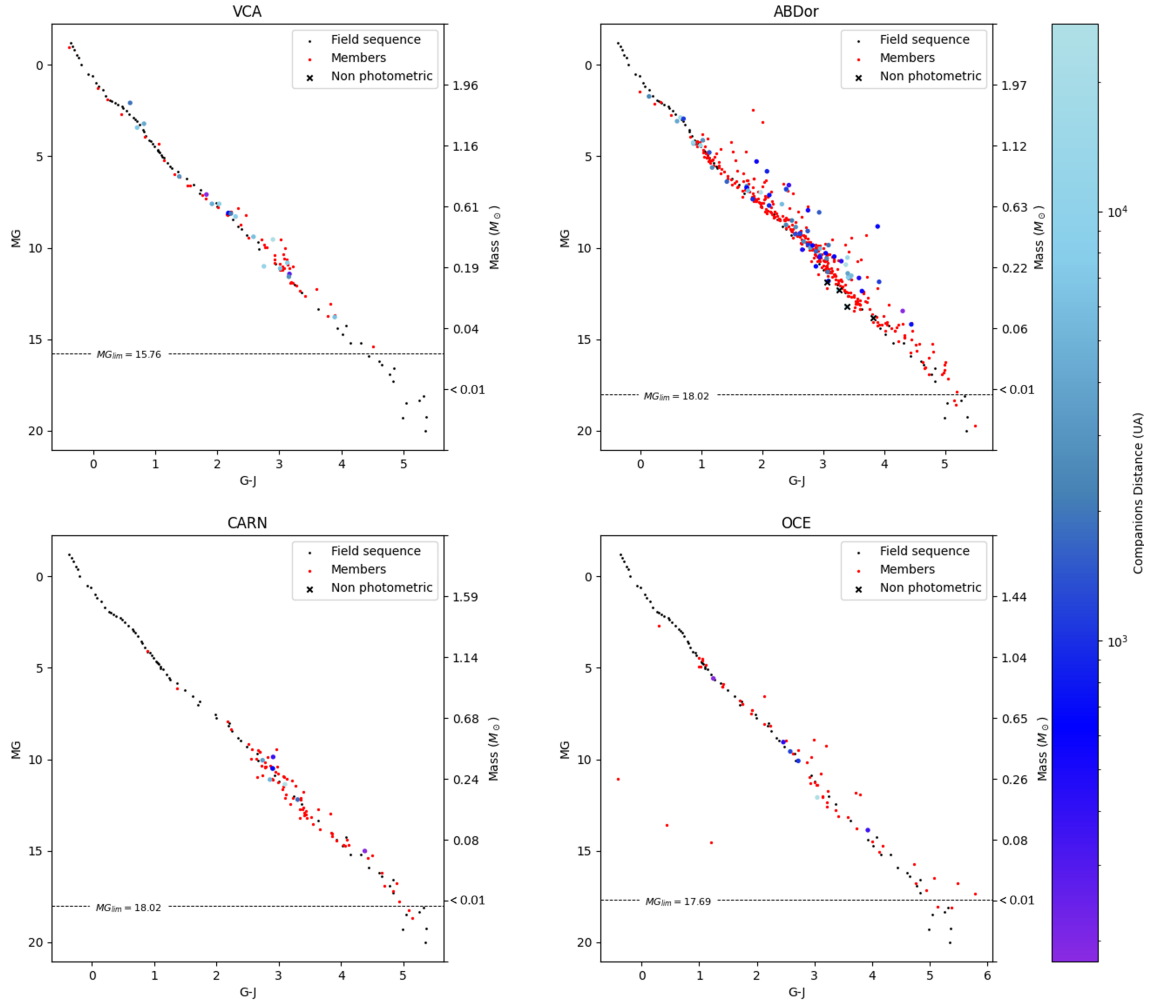


Figura 4.3: Diagramas de Magnitud absoluta en G frente a $G-J$ de los miembros de cada YMG (rojo) y los compañeros encontrados en nuestra búsqueda (gradiente violeta-azul), comparados con la secuencia de objetos del campo dada por Pecaut & Mamajek (2013).

Los compañeros se muestran en un gradiente de violeta a azul claro, en función de su distancia al miembro del YMG.

Los compañeros que, una vez analizados, se han clasificado como fotométricamente malos se representan con una “X” encima.

Se representa un tercer eje a la derecha de cada diagrama que informa de las masas de los objetos en M_{\odot} .

El valor MG_{lim} , representa el límite de magnitud de GAIA en el extremo tenue para cada YMG.

Como puede verse en las Figuras 4.2 y 4.3, estos diagramas muestran los miembros de cada YMG y los compañeros encontrados en nuestra búsqueda comparados con la secuencia de objetos viejos del campo dada por Pecaut & Mamajek (2013).

Gracias a estos diagramas, donde el eje derecho nos muestra las masas de los objetos según la edad del YMG y la MG de los objetos, podemos ver que para la mayoría de YMGs la búsqueda de enanas marrones, es decir, compañeros entre $0.012-0.072M_{\odot}$, es completa excepto para 32ORI por su mayor distancia y para THA, en el que se llega hasta $\sim 20M_J$, cerca de la frontera planetaria. Sin embargo, en el rango de compañeros de masa planetaria ($< 0,012M_{\odot}$ o, lo que es lo mismo, $< 13M_J$) solo somos completos hasta unas $10M_J$ en alguno de los casos, como por ejemplo β PIC, ABDMG y CARN, los YMG más cercanos.

En general, podemos decir que nuestra búsqueda de compañeras enanas marrones

no está limitada por la magnitud límite de $G < 20,41$ mag, aunque sí a separaciones angulares mayores que 0.5 segundos de arco y no es completa hasta separaciones mayores que 3 segundos de arco. En cuanto a los compañeros de masa planetaria, en la mayoría de los casos sí estamos limitados por la magnitud límite de GAIA, pero como veremos más adelante, nuestra búsqueda nos ha permitido encontrar compañeros interesantes dentro del rango de masas planetarias.

Por otro lado, comparando con otros trabajos (Chinchilla 2021), se ha comprobado que con GAIA se pueden perder compañeros porque muchas veces, sobre todo con binarias, no proporciona todos los datos astrométricos. Aproximadamente, unos 10 compañeros conocidos no se están encontrando en nuestra búsqueda porque faltan datos astrométricos en GAIA DR3 para ellos, posiblemente por ser binarias cercanas.

4.2.2. Contaminantes

En los diagramas MG frente a G-J presentados en las Figuras 4.2 y 4.3, podemos ver como la mayoría de los miembros de cada YMG siguen una secuencia (pre-secuencia principal) por encima de la de los objetos viejos del campo (Pecaut & Mamajek 2013).

Con este criterio, en las Figuras 4.2 y 4.3, hemos considerado que los candidatos a compañeros que siguen la secuencia del campo, y que por tanto no siguen la secuencia de su YMG, no son buenos candidatos fotométricamente. Esta selección de candidatos a contaminantes fotométricos de cada YMG se indica en las Tablas del Apéndice A y no se incluyen en los estudios de frecuencias de compañeros. De estos 50 objetos, solamente 6 se encuentran a separaciones menores de 10.000 UA (en torno al 2% de los compañeros a estas separaciones), lo que parece confirmar que hasta estas separaciones no tenemos un gran número de contaminantes.

Por otro lado, en el primer panel de la Figura 4.4 se puede ver que el número de compañeros crece desde una separación angular de 0.5 segundos de arco, que es la mínima separación resuelta por GAIA, hasta un máximo de 1-2 segundos de arco y luego comienza a decrecer. Esto encaja con la completitud de resolución de binarias de GAIA dada por Gaia Collaboration et al. (2021), por lo que nuestra búsqueda de compañeros está efectivamente limitada a separaciones angulares mayores que 0.5 segundos de arco y una completitud de 2-3 segundos de arco.

Además, la frecuencia de compañeros es una función decreciente con la separación física, como podemos comprobar en el segundo panel de la Figura 4.4. En este podemos ver como el número de compañeros decrece continuamente hasta unas 10.000 UA. A partir de 20.000-50.000 UA parece que el número de objetos se mantiene, lo que puede indicar que empezamos a estar afectados por contaminantes.

No obstante, es preciso aclarar que aunque consideremos que por encima de 10.000 UA podemos estar afectados por contaminantes, es posible que haya buenos compañeros a mayores distancias. Por ejemplo, Lee et al. (2022) identificaron dos grupos de sistemas binarios: binarias amplias ($< 10^4$ AU) y binarias ultra amplias ($> 10^4$ AU); y detectaron un cambio en la distribución entre los regímenes de ambos grupos, lo que podría

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

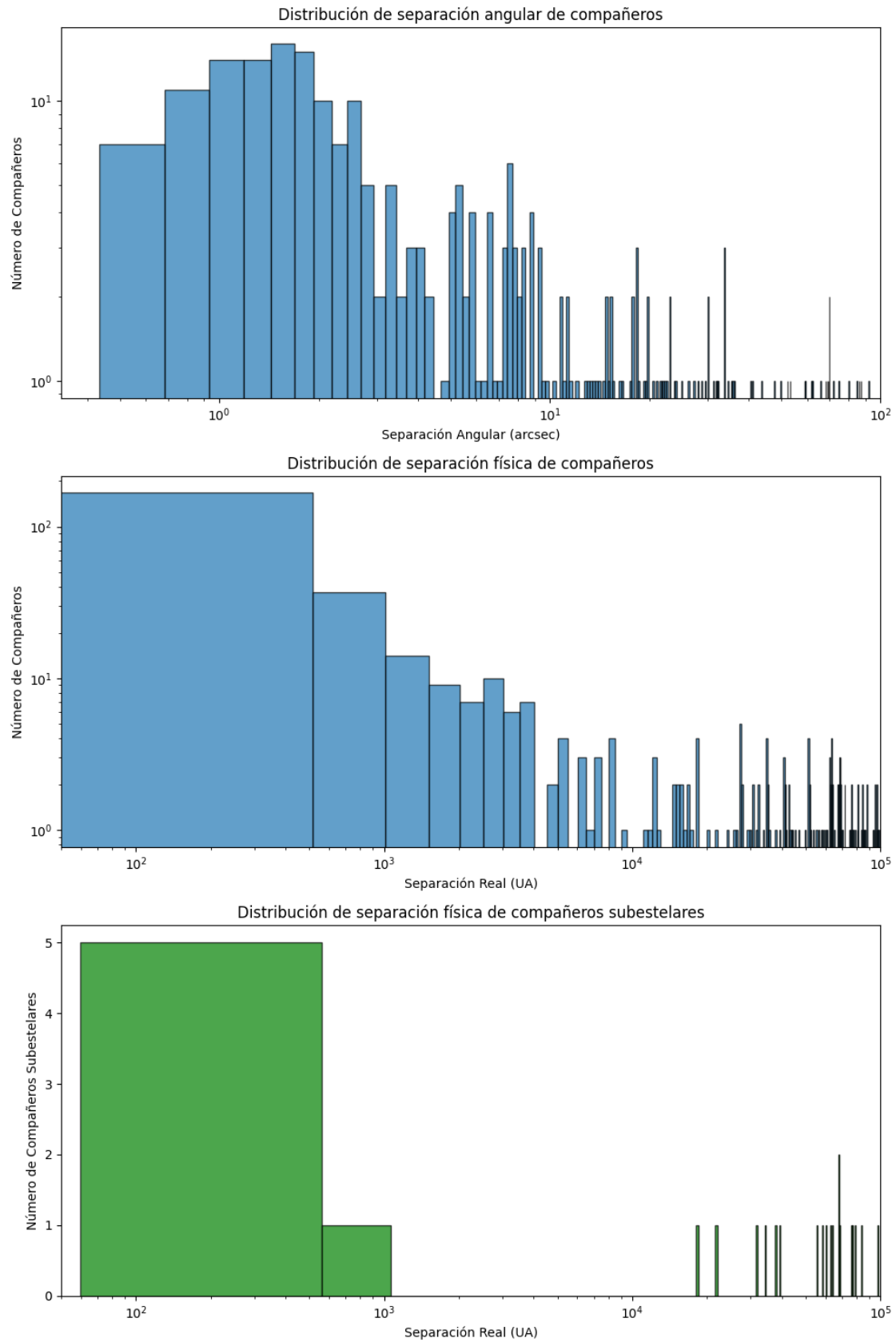


Figura 4.4: Distribución de las separaciones angulares y físicas de todos los compañeros encontrados para los miembros de los YMG (azul) y distribución de las separaciones físicas de los compañeros subestelares (verde).

indicar un mecanismo de formación diferente para cada uno. Para confirmar o descartar estos sistemas, se requiere un seguimiento posterior y observaciones adicionales de estos candidatos, lo que está fuera del alcance de este trabajo.

Como podemos decir que la cantidad de contaminantes en nuestra estadística no es significativa hasta separaciones mayores de 10.000 UA y, por construcción, nuestra búsqueda solo es completa hasta estas separaciones, para nuestros estudios de frecuencias de compañeros hemos considerado solamente los objetos encontrados a separaciones ≤ 10.000 UA.

En el panel inferior de la Figura 4.4, que representa la distribución de separaciones físicas de los compañeros subestelares ($\leq 0,072M_{\odot}$) encontrados en nuestra búsqueda, podemos ver que el número de candidatos, además de ser escaso, parece disminuir más rápidamente hasta unas 1.000 UA y que, a mayores distancias, parece indicar que es poco probable encontrar objetos en este rango de masas y distancias. Esto podría ser una explicación de por qué no hemos encontrado objetos subestelares para los YMG más lejanos como 32ORI, aunque estas estadísticas están dominadas por números muy bajos y habría que confirmarlas con un número mayor de compañeros subestelares.

En general, podemos decir que nuestra búsqueda no es completa para separaciones angulares muy bajas ($\sim 0,5-3''$) y para objetos muy débiles. Un ejemplo claro de ese límite, es que en nuestra búsqueda no aparece TWA 27B, detectado con óptica adaptativa, como compañero de TWA 27, lo que se explica porque es una enana marrón que encuentra a una distancia angular de $0.54''$ de su estrella y GAIA no es capaz de resolverla. A separaciones angulares altas, podemos decir que nuestra búsqueda hasta unas 10.000 UA es bastante completa, aunque nuestras estimaciones de frecuencias de compañeros siempre son un límite inferior, ya que siempre se pueden perder objetos.

4.3. Frecuencia de compañeros

En esta sección, y una vez eliminados los contaminantes fotométricos comentados en la sección anterior, presentamos la estadística de la frecuencia de compañeros, tanto estelares como subestelares, a menos de 10.000 UA para cada YMG, y analizamos si existe o no una dependencia con la edad.

De los 1.713 miembros alrededor de los cuales se hizo la búsqueda de compañeros, se encontraron 260 sistemas con 276 compañeros a separaciones menores de 10.000 UA, de los cuales 11 de ellos resultaron ser sistemas múltiples (de más de 2 objetos). De estos 276 compañeros encontrados, 27 de ellos son objetos subestelares repartidos en 24 de los sistemas. En la Tabla 4.2 presentamos este recuento para cada YMG, así como la frecuencia de compañeros, tanto estelares como subestelares, calculada para cada uno.

En primer lugar, se observa que nuestra búsqueda no ha encontrado compañeros subestelares en algunos YMG, lo que puede ser explicado por los límites de separación angular ($0.5-3''$) y, en algún caso particular como 32ORI, por el límite de magnitud en G de GAIA, comentados en la sección anterior. Además, podemos ver que la frecuencia

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

YMG	Edad (Myr)	Compleitud (UA)	Num miembros (> 68 %)	Sistemas (*)	Num comp(*)	Frec comp(*)	Sist multip(*)	Sistemas Subest(*)	Num comp Subest(*)	Frec comp Subest(*)
TWA	10 ± 3	>180	101	16	16	15,8 ± 4,0%	0	5	7	5,0 ± 2,2%
32ORI	22 ⁺⁴ ₋₃	>288	55	6	7	10,9 ± 4,5%	1	0	0	<1,8%
βPMG	24 ± 3	>90	254	44	49	17,3 ± 2,6%	3	9	9	3,5 ± 1,2%
COL	42 ⁺⁶ ₋₄	>150	225	44	47	19,6 ± 2,9%	2	2	3	0,9 ± 0,6%
THA	45 ± 4	>138	302	29	31	9,6 ± 1,8%	2	2	2	0,7 ± 0,5%
CAR	45 ⁺¹¹ ₋₇	>180	112	10	11	8,9 ± 2,8%	1	0	0	<0,9%
VCA	89 ⁺⁵ ₋₇	>255	66	4	4	6,1 ± 3,0%	0	0	0	<1,5%
ABDMG	149 ⁺⁵¹ ₋₁₉	>90	443	84	87	19,0 ± 2,1%	1	5	5	1,1 ± 0,5%
CARN	~200	>90	84	13	13	15,5 ± 4,3%	0	1	1	1,2 ± 1,2%
OCE	~500	>105	71	10	11	14,1 ± 4,5%	1	0	0	<1,4%
Totales			1.713	260	276		11	24	27	

Tabla 4.2: En esta tabla se presenta una recopilación de los Young Moving Groups (YMGs) considerados en este trabajo, el número de miembros seleccionados para la búsqueda de compañeros (aquellos con probabilidad de ser miembro $\geq 68\%$), la cantidad de sistemas encontrados para cada YMG y la frecuencia de compañeros, tanto estelares como subestelares, calculada para cada uno.

(*) : a una separación física menor o igual a 10.000 UA.

de compañeros a gran separación, especialmente la de compañeros subestelares, es muy baja ($\sim 1\text{-}5\%$), lo que puede suponer que en los YMGs con pocos miembros (<100) haya una probabilidad muy baja de encontrar algún compañero subestelar.

Teniendo esto en cuenta, y viendo los resultados dados en la Tabla 4.2, no parece que exista ninguna dependencia entre la frecuencia de compañeros estelares y la edad del YMG, pero sí que parece haberla entre la frecuencia de compañeros subestelares y la edad del YMG.

No obstante, para poder comparar los resultados de cada YMG es necesario tener en cuenta la completitud inferior en separación física y establecer los mismos límites para todos. Para ello, hemos asumido una completitud de objetos en el límite inferior de 3 segundos de arco (Gaia Collaboration et al. 2021) para 32ORI, que es el YMG más distante a ~ 96 parsecs de media, lo que equivale a unas 300 UA en separación física, y hemos trasladado este límite al resto de YMGs.

YMG	Edad (Myr)	Num miembros (> 68 %)	Sistemas (*)	Frec comp(*)	Sistemas Subest(*)	Frec comp Subest(*)
TWA	10 ± 3	101	7	6,9 ± 2,6%	1	1,0 ± 1,0%
32ORI	22 ⁺⁴ ₋₃	55	5	9,1 ± 4,1%	0	<1,8%
βPMG	24 ± 3	254	23	9,1 ± 1,9%	3	1,2 ± 0,7%
COL	42 ⁺⁶ ₋₄	225	21	9,3 ± 2,0%	0	<0,4%
THA	45 ± 4	302	17	5,6 ± 1,4%	2	0,7 ± 0,5%
VCA	89 ⁺⁵ ₋₇	66	3	7,1 ± 2,5%	0	<0,9%
CAR	45 ⁺¹¹ ₋₇	112	8	4,5 ± 2,6%	0	<1,5%
ABDMG	149 ⁺⁵¹ ₋₁₉	443	31	7,0 ± 1,3%	1	0,2 ± 0,2%
CARN	~200	84	4	4,8 ± 2,4%	0	<1,2%
OCE	~500	71	3	4,2 ± 2,4%	0	<1,4%
Totales		1.713	122		7	

Tabla 4.3: En esta tabla se presentan las frecuencias de compañeros, tanto estelares como subestelares, para cada YMG teniendo en cuenta el límite de completitud inferior en distancia establecido por 32ORI.

(*) : a separaciones físicas entre 300 y 10.000 UA.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En la Tabla 4.3 presentamos la estadística con los límites de completitud aplicados, es decir, solo se tienen en cuenta los compañeros encontrados a separaciones físicas entre 300 y 10.000 UA. En ella se puede ver que el número de miembros con compañeros a esas separaciones es pequeño, y muy pocos tienen compañeros subestelares, por lo que la barra de error es muy grande y no es posible determinar si existe una relación entre la frecuencia de compañeros y la edad de cada YMG.

Para tener una mejor estadística de objetos subestelares por edad y reducir la barra de error, sin dejar de tener en cuenta la completitud inferior en distancia, se elimina a 32ORI de la estadística y se calculan las frecuencias de compañeros, tanto estelares como subestelares, no por cada YMG sino por grupo de edades. Para ello hemos establecido tres grupos de edad: 10-30 Myr, que incluye TWA y β PMG, 30-70 Myr, que incluye COL, THA y CAR, y 70-200 Myr, que incluye VCA, ABDMG y CARN.

Edad (Myr)	Num miembros (> 68 %)	Sistemas	Frecuencia compañeros	Sistemas Subestelares	Frecuencia compañeros Subestelares
10-30	355	60	$16,9 \pm 2,2\%$	14	$3,9 \pm 1,1\%$
30-70	639	83	$13,0 \pm 1,4\%$	4	$0,6 \pm 0,3\%$
70-200	593	101	$17,0 \pm 1,7\%$	6	$1,0 \pm 0,4\%$

Tabla 4.4: En esta tabla se presentan las frecuencias de compañeros, tanto estelares como subestelares, para cada rango de edad de los YMG y a separaciones físicas entre 100-200 UA y 10.000 UA. Se dejan fuera de esta estadística general a 32ORI por su lejanía y a OCE por su edad.

En la Tabla 4.4 podemos observar que la frecuencia de compañeros estelares no presenta dependencia con la edad y se mantiene estable en todos los rangos de edades. Sin embargo, en el caso de los compañeros subestelares, sí que vemos una disminución de su frecuencia con la edad, confirmando lo que parecía ocurrir con los cálculos de la Tabla 4.2, aunque las diferencias no son muy significativas porque el número de compañeros subestelares es bajo y, por tanto, las barras de error son grandes.

En general, hemos encontrado que los sistemas con compañeros a gran separación son poco frecuentes ($\sim 15 \pm 1\%$), especialmente aquellos con compañeros subestelares, donde las frecuencias obtenidas varían entre el 1-5 %. Aunque no parece que haya ninguna relación entre la frecuencia de compañeros estelares y la edad, podemos decir que sí hay una tendencia en el número de compañeros subestelares a grandes separaciones con la edad. Los YMG más jóvenes, de ~ 20 Myr, presentan frecuencias de compañeros de $\sim 4\%$, mientras que los YMG con edades ~ 50 Myr o mayores, que presentan unas frecuencias de $\sim 1\%$.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Chinchilla (2021), donde se realizó una búsqueda de compañeros subestelares con VHS y 2MASS para Upper Scorpius (5-15 Myr). A pesar de que esta búsqueda era menos completa que la nuestra a cortas separaciones físicas, se obtuvo una frecuencia de compañeros subestelares del $1.8 \pm 0.4\%$, mayor que la de nuestra búsqueda de compañeros subestelares en YMGs más viejos.

Un estudio previo, realizado por Gauza (2016), obtuvo una frecuencia de $0.5 \pm 0.1\%$

para compañeros ultra-fríos a separaciones mayores de 50-100 UA de estrellas viejas del campo. Otro estudio de Deacon et al. (2014) identificó 88 compañeros de tipo M y L a separaciones mayores de 300 UA en una muestra de más de 87.000 estrellas, y encontró una frecuencia de $0.10 \pm 0.01\%$ para el rango de masas y separaciones estudiado. En nuestra estadística hemos encontrado frecuencias significativamente más altas, lo que muestra que la frecuencia de compañeros subestelares a grandes separaciones es mayor para estrellas jóvenes.

Esta disminución de la frecuencia de compañeros subestelares con la edad de los YMG, puede explicarse por la evolución dinámica de estos sistemas, que debido a otros encuentros estelares pueden desligarse con el paso del tiempo. Sin embargo, las diferencias obtenidas no son del todo significativas, ya que el número de compañeros subestelares es bajo y por tanto las barras de error son grandes.

4.4. Compañeros interesantes

En esta sección nos centraremos en varios casos individuales de cada YMG que resultan interesantes, tanto de sistemas conocidos, como de compañeros encontrados o descubiertos en el presente trabajo.

4.4.1. TW Hydrae

En TW Hydrae, de los 101 miembros y candidatos a miembros que fueron seleccionados para la búsqueda, se encontró que 23 de ellos tenían candidatos a ser compañeros y que, 9 de ellos, tenían 15 candidatos a compañeros subestelares.

Este YMG, cuyos miembros y compañeros encontrados se pueden ver con detalle en la Tabla A.1 del Apéndice A, fue el primero en ser analizado para el presente trabajo, y es interesante destacar los siguientes objetos:

- 2MASS J10394605-3510139: enana marrón binaria con Gaia DR3 5444361399804795392, ya identificada por Chinchilla (2021).
- 2MASS J11191302-4342401: enana marrón que forma un sistema binario con Gaia DR3 5376866126183688320, e identificada por Chinchilla (2021).
- **TWA 28**: es una estrella enana marrón ($20M_J$) de tipo espectral M8, que puede ser compañera a gran separación (~ 44.000 UA) de V* TW Hya, estrella T-Tauri que da nombre al YMG. Ya fue identificada como posible compañera por Chinchilla (2021).

4.4.2. 32 Orionis

En 32 Orionis, de los 55 miembros y candidatos a miembros que fueron seleccionados para la búsqueda, se encontró que 21 de ellos tenían posibles compañeros. En estos 21 sistemas, se encontraron 9 candidatos subestelares en 7 de ellos.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este YMG se han encontrado varias compañeras enanas marrones a más de 10.000 UA de la primaria que, aunque pueden no ser compañeros físicos, sí parecen objetos subestelares del grupo. De los miembros y compañeros de este YMG, que pueden verse con más detalle en la Tabla A.2 del Apéndice A, se destaca lo siguiente:

- Hemos encontrado que los siguientes objetos parecen miembros de este YMG, pero no han sido identificados anteriormente:
 - Gaia DR3 3238067069561233920
 - Gaia DR3 3236331387377943552
 - 2MASS J05272804+0626438
- **Gaia DR3 3338010791036352256:** es compañero cercano de HD 245059. Como no tienen magnitud, podría ser un objeto débil y por tanto un candidato a enana marrón. Además, este objeto tiene un RUWE=7 (Renormalised Unit Weight Error, que evalúa la calidad de los ajustes a las posiciones observadas de estrellas en el espacio), que indica que podría ser un objeto binario, por lo que estaríamos ante un sistema triple cercano.

4.4.3. β Pictoris

En β Pictoris, de los 254 miembros que se seleccionaron para la búsqueda, se encontró que 54 de ellos tenían candidatos a ser compañeros y que 11 de ellos tenían un compañero subestelar.

De los miembros de este YMG y sus posibles compañeros, los cuales se detallan en la Tabla A.3 del Apéndice A, se destacan los siguientes casos:

- **2MASS J19481703-2720334:** objeto miembro del YMG, candidato a ser enana marrón, es compañero del también miembro UCAC4 314-239934.
- **2MASS J00460605+1909443:** esta enana marrón es compañera a ~ 160 UA del objeto UCAC4 546-001530 y no ha sido catalogada previamente como miembro del YMG.
- **Gaia DR3 4045875724236099584:** objeto de masa planetaria no conocido, que es compañero a unas 1.000 UA del miembro 2MASS J18150089-3201557, candidato a objeto estelar joven.

4.4.4. Columba

En Columba, de los 225 miembros y candidatos a miembros que se seleccionaron para la búsqueda, se encontraron candidatos a ser compañeros para 65 de ellos, de los cuales 23 eran objetos subestelares repartidos en 14 sistemas.

De los miembros de este YMG y de los posibles compañeros encontrados, detallados en la Tabla A.4 del Apéndice A, se destaca lo siguiente:

- **2MASS J05533704-3149121:** esta enana marrón conocida, resulta ser un sistema binario de movimiento propio y distancia común por GAIA, y su posible compañero subestelar es Gaia DR3 2890718637539875328.
- **2MASS J02013550-1609538:** se trata de un candidato a estrella de baja masa que se encuentra en la frontera subestelar, y que es compañero a 500 UA de BD-16 351.
- **LP 12-90:** esta estrella de baja masa pertenece supuestamente a la Asociación Argus y en cuanto a su primaria, que es binaria (HD 220140A y B), su componente A esta asignado al grupo de movimiento de las Pleiades y su componente B a Columba.
- **Gaia DR3 4773708200766730880:** compañero subestelar no conocido de 2MASS J05111098-4903597 a 180 UA. Se trata de , un candidato a enana marrón cerca de la frontera de los objetos de masa planetaria. No ha sido resuelto por 2MASS ni por ninguna otra imagen limitada por *seeing*, ya que se encuentra a solo 2.4 segundos de arco de la primaria.

4.4.5. Tucana-Horologium

En Tucana-Horologium, de los 302 miembros y candidatos a miembros que se seleccionaron para la búsqueda, se encontraron candidatos a ser compañeros para 37 de ellos, de los cuales 4 tenían compañero subestelar.

De los miembros de este YMG y de los posibles compañeros encontrados, detallados en la Tabla A.5 del Apéndice A, se destaca lo siguiente:

- **2MASS J23225240-6151114:** es una estrella M5 de baja masa que tiene como compañero a 2MASS J23225299-6151275, un objeto de masa planetaria de tipo espectral L2gamma. Ambos son miembros conocidos del YMG, pero no se había propuesto anteriormente que fueran compañeros.
- **2MASS J02401209-5305527:** posible compañero muy separado (~ 40.000 UA) del sistema binario conocido compuesto por CD-53 544 y V* AF Hor. Este objeto puede ser enana marrón o un objeto de masa planetaria, pero no podemos asegurar que sean compañeros físicos en la actualidad. Este objeto ya fue identificado como posible compañero por Chinchilla (2021).
- **RX J0215.9-0929C:** parece una enana marrón a 150 UA de la estrella binaria RX J0215.9-0929(AB) no resuelta por GAIA. Aunque ya se sabía que era compañero (Gaia Collaboration et al. 2021), no se conocía su movimiento orbital ni que es un candidato a enana marrón.
- *** ups04 Eri:** es una binaria espectroscópica conocida pero no resuelta hasta ahora. GAIA ha resuelto que el objeto compañero es Gaia DR3 4870527586936020864.

- **HD 22213:** es una binaria conocida pero no resuelta hasta ahora, cuyo compañero Gaia DR3 5115334331895751680 ha sido resuelto por GAIA.

4.4.6. Carina

En Carina, de los 112 miembros que se seleccionaron para la búsqueda, se encontró que 19 de ellos tenían candidatos a ser compañeros. Además, se encontraron 7 candidatos a compañeros subestelares en 5 de estos sistemas.

De los miembros de este YMG y sus posibles compañeros, los cuales se detallan en la Tabla A.7 del Apéndice A, se puede destacar lo siguiente:

- **2MASS J05240192-7109292:** es un candidato a enana marrón a 290 UA de una estrella M5, LHA 120-S 162. Esta enana marrón ya había sido identificada por Gagné & Faherty (2018), pero no se había considerado que eran compañeros por la diferencia de movimiento orbital. Aunque la estrella está clasificada como una supuesta nova en la Gran Nube de Magallanes (LMC, por sus siglas en inglés), esto parece ser un error, ya que la distancia de la estrella al Sol es mucho menor.

4.4.7. Volans-Carina

En Volans-Carina, de los 66 miembros que se seleccionaron para la búsqueda, se encontró que 12 de ellos tenían candidatos a ser compañeros y que 2 eran sistemas con compañeros subestelares.

De los miembros de este YMG y sus posibles compañeros, los cuales se detallan en la Tabla A.6 del Apéndice A, cabe destacar lo siguiente:

- **Gaia DR3 5298315572392602496:** candidato a compañero subestelar a unas 60.000 UA de 2MASS J08555655-6146057. No obstante, por la distancia a la que se encuentra, es menos probable que esté físicamente ligado.
- **2MASS J09244959-6216319:** es un candidato a enana marrón que puede ser compañero a ~ 95.000 UA del objeto Gaia DR3 5250597283150674432, aunque la separación es muy grande y no podemos asegurar que esté físicamente ligado.

4.4.8. AB Doradus

En AB Doradus, de los 443 miembros que se seleccionaron para la búsqueda, se encontró que 94 de ellos tenían candidatos a ser compañeros. En 9 de estos sistemas, se encontraron 10 candidatos a compañeros subestelares.

De los miembros de este YMG y sus posibles compañeros, los cuales se detallan en la Tabla A.8 del Apéndice A, se puede destacar los siguientes casos interesantes:

- **2MASS J2331016-04061:** es una enana marrón binaria conocida M8.0V+L3.0V, pero no se conocía que es compañera de la estrella HD 221356 a gran separación (~ 11.000 UA).
- **Gaia DR3 5329184189538069760:** candidata a enana marrón que junto con Gaia DR3 5329184189553837184 forman una estrella binaria de muy baja masa.

4.4.9. Carina-Near

En Carina-Near, de los 84 miembros y candidatos a miembros que fueron seleccionados para la búsqueda, se encontró que 14 de ellos tenían posibles compañeros y que 1 de ellos era un sistema con compañero subestelar.

En este YMG se han encontrado compañeros que no estaban catalogados como tal, y que pueden verse con más detalle en la Tabla A.9 del Apéndice A.

4.4.10. Oceanus

En Oceanus, de los 71 miembros que se seleccionaron para la búsqueda, se encontró que 13 de ellos tenían candidatos a ser compañeros. Además, se encontraron 3 objetos subestelares en 2 de los sistemas.

De los miembros de este YMG y sus posibles compañeros, los cuales se detallan en la Tabla A.10 del Apéndice A, cabe destacar lo siguiente:

- **Gaia DR3 4313419854253879808:** enana marrón que puede ser compañera a gran separación (~ 33.000 UA) de Gaia DR3 4313402227672695808. A pesar de la distancia, parece un buen candidato a compañero porque tienen movimiento propio común y es muy cercana a nuestro Sol. En este caso, no parece que puedan estar cercanos en el cielo pero no ligados físicamente, ya que los miembros de este YMG están distribuidos por todo el cielo.
- **Gaia DR3 2078105327586616832:** se trata de un objeto en la frontera subestelar muy cerca de HD 186306, y que no era conocido como compañero.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

Conclusiones

En este trabajo se ha llevado a cabo una extensa recopilación y análisis de miembros y candidatos a miembros de 10 grupos de movimiento jóvenes (YMG). Estos miembros fueron correlados con los catálogos de GAIA DR3 y 2MASS para obtener información detallada tanto astrométrica como fotométrica.

Posteriormente, se realizó una búsqueda de compañeros, hasta al menos una separación de 10.000 UA, alrededor de aquellos con una probabilidad de ser miembros mayor al 68 %, utilizando como criterios de búsqueda una diferencia de paralaje menor de 4 mas y una diferencia de movimiento propio menor de 8 mas/yr. Como se observó que algunos compañeros más cercanos podrían tener una mayor diferencia en movimiento propio que nuestro criterio debido a movimiento orbital, se realizó una segunda búsqueda sin restricción de movimiento propio a una separación de 20 segundos de arco, lo que equivale a una separación física de al menos 200 UA para las estrellas más cercanas. Además, se calcularon las masas de los miembros y sus compañeros utilizando modelos de GAIA. Durante este proceso se descartaron varios compañeros que resultaron no ser buenos fotométricamente, al no seguir las secuencias fotométricas de los miembros del YMG en los diagramas MG frente a G-J.

Como resultado de este trabajo, se han clasificado como candidatos a compañeros 289 objetos ya conocidos, además de encontrar y clasificar como candidatos a miembros 144 nuevos objetos que no eran conocidos previamente. Por otro lado, se ha calculado la frecuencia de compañeros, tanto estelares como subestelares para cada YMG. En el caso de los compañeros estelares se ha encontrado que la frecuencia es de $\sim 15\%$ para todos los YMG, mientras que para los compañeros subestelares se ha encontrado que la frecuencia es $\sim 4\%$ para edades de ~ 20 Myr y $\sim 1\%$ para los rangos de edad de ~ 50 Myr y superiores.

De estos resultados, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Los objetos subestelares a grandes separaciones son poco frecuentes, del orden del 1-5 %.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- En general, la cantidad de compañeros disminuye rápidamente con la distancia.
- No se observa una dependencia clara con la edad en la frecuencia de compañeros estelares.
- Parece que la frecuencia de compañeros subestelares disminuye con la edad, aunque el número de objetos es bajo y, por tanto, el error es alto.
- Se ha obtenido un catálogo completo de estrellas jóvenes pertenecientes a 10 YMGs de la vecindad solar, que será útil para la búsqueda de compañeros cercanos en futuras misiones como Euclid y mediante el uso de óptica adaptativa.

Trabajo futuro

Para continuar y completar el presente trabajo se sugiere, en primer lugar, incrementar el número de miembros de los YMG o aumentar el número de YMG estudiados, con el fin de mejorar la estadística y que las barras de error sean más pequeñas.

Por otro lado, sería interesante observar los miembros de los YMG con óptica adaptativa y con el satélite Euclid, para encontrar compañeros a separaciones más cortas, donde además esperamos que sean más abundantes.

Para los compañeros más débiles, sería interesante medir las velocidades radiales de los que no las tienen en GAIA, para aclarar si son compañeros y su pertenencia al YMG. Además, se sugiere resolver la fotometría de los objetos que aún no la tienen y estudiarlos con espectroscopía de baja resolución para determinar su tipo espectral. Para compañeros orbitales muy cercanos sería interesante, como trabajo futuro, medir movimientos orbitales y calcular masas dinámicas.

Por último, se sugiere estudiar con más detalle los compañeros interesantes encontrados en el presente trabajo.

Bibliografía

- Baraffe, I., Homeier, D., Allard, F., & Chabrier, G. 2015, *A&A*, 577, A42
- Basri, G. 2000, *ARA&A*, 38, 485
- Bate, M. R., Bonnell, I. A., & Bromm, V. 2003, *MNRAS*, 339, 577
- Bell, C. P. M., Mamajek, E. E., & Naylor, T. 2015, *MNRAS*, 454, 593
- Bell, C. P. M., Murphy, S. J., & Mamajek, E. E. 2017, *MNRAS*, 468, 1198
- Boss, A. P. 2001, *ApJ*, 563, 367
- Bowler, B. P., Shkolnik, E. L., Liu, M. C., et al. 2015, *ApJ*, 806, 62
- Chabrier, G., Baraffe, I., Allard, F., & Hauschildt, P. H. 2005, arXiv e-prints, astro
- Chauvin, G., Lagrange, A. M., Dumas, C., et al. 2004, *A&A*, 425, L29
- Chinchilla, P. 2021, PhD thesis, Universidad de La Laguna
- Cortés-Contreras, M., Béjar, V. J. S., Caballero, J. A., et al. 2017, *A&A*, 597, A47
- Davidson, K. 1975, *Icarus*, 26, 99
- de Bruijne, J. H. J., Allen, M., Azaz, S., et al. 2015, *A&A*, 576, A74
- Deacon, N. R., Liu, M. C., Magnier, E. A., et al. 2014, *ApJ*, 792, 119
- Eggen, O. J. 1961, *Royal Greenwich Observatory Bulletins*, 41, 245
- Faherty, J. K., Bochanski, J. J., Gagné, J., et al. 2018, *ApJ*, 863, 91
- Fisher, R. T. 2004, *ApJ*, 600, 769
- Fontanive, C., Biller, B., Bonavita, M., & Allers, K. 2018, *MNRAS*, 479, 2702
- Gagné, J., & Faherty, J. K. 2018, *ApJ*, 862, 138
- Gagné, J., Faherty, J. K., & Mamajek, E. E. 2018, *ApJ*, 865, 136
- Gagné, J., Moranta, L., Faherty, J. K., et al. 2023, *ApJ*, 945, 119

BIBLIOGRAFÍA

- Gaia Collaboration, Smart, R. L., Sarro, L. M., et al. 2021, *A&A*, 649, A6
- Gauza, B. 2016, PhD thesis, Universidad de La Laguna
- Ghez, A. M., Neugebauer, G., & Matthews, K. 1993, *AJ*, 106, 2005
- Herschel, W. 1802, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 92, 477
- . 1803, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 93, 339
- Kastner, J. H., Zuckerman, B., Weintraub, D. A., & Forveille, T. 1997, *Science*, 277, 67
- Kraus, A. L., Ireland, M. J., Martinache, F., & Hillenbrand, L. A. 2011, *ApJ*, 731, 8
- Kumar, S. S. 1963, *ApJ*, 137, 1121
- Lagrange, A. M., Gratadour, D., Chauvin, G., et al. 2009, *A&A*, 493, L21
- Lecavelier des Etangs, A., & Lissauer, J. J. 2022, , 94, 101641
- Lee, J., Song, I., & Murphy, S. J. 2022, *MNRAS*, 511, 6179
- Leinert, C., Zinnecker, H., Weitzel, N., et al. 1993, *A&A*, 278, 129
- Luhman, K. L., Stauffer, J. R., & Mamajek, E. E. 2005, *ApJ*, 628, L69
- Malo, L., Doyon, R., Lafrenière, D., et al. 2013, *ApJ*, 762, 88
- Mamajek, E. E. 2007, in *Triggered Star Formation in a Turbulent ISM*, ed. B. G. Elmegreen & J. Palous, Vol. 237, 442–442
- Mestel, L., & Ruderman, M. A. 1967, *MNRAS*, 136, 27
- Michell, J. 1767, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 57, 234
- Montes, D., López-Santiago, J., Gálvez, M. C., et al. 2001, *MNRAS*, 328, 45
- Nakajima, T., Oppenheimer, B. R., Kulkarni, S. R., et al. 1995, *Nature*, 378, 463
- Padoan, P., & Nordlund, Å. 2004, *ApJ*, 617, 559
- Pecaut, M. J., & Mamajek, E. E. 2013, *ApJS*, 208, 9
- Pollack, J. B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P., et al. 1996, *Icarus*, 124, 62
- Raghavan, D., McAlister, H. A., Henry, T. J., et al. 2010, *ApJS*, 190, 1
- Rebolo, R., Zapatero Osorio, M. R., & Martín, E. L. 1995, *Nature*, 377, 129
- Reipurth, B., & Mikkola, S. 2012, *Nature*, 492, 221

BIBLIOGRAFÍA

- Rybizki, J., Demleitner, M., Bailer-Jones, C., et al. 2020, *PASP*, 132, 074501
- Stevenson, D. J. 1978, , 3, 227
- Tarter, J. C. 1975, PhD thesis, University of California, Berkeley
- Tohline, J. E. 2002, *ARA&A*, 40, 349
- Torres, C. A. O., da Silva, L., Quast, G. R., de la Reza, R., & Jilinski, E. 2000, *AJ*, 120, 1410
- Torres, C. A. O., Quast, G. R., Melo, C. H. F., & Sterzik, M. F. 2008, in *Handbook of Star Forming Regions, Volume II*, ed. B. Reipurth, Vol. 5, 757
- van Leeuwen, F., de Bruijne, J., Babusiaux, C., et al. 2022, *Gaia DR3 documentation*, *Gaia DR3 documentation*, European Space Agency; Gaia Data Processing and Analysis Consortium. Online at “<https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/index.html>”
- Whitworth, A. P., & Zinnecker, H. 2004, *A&A*, 427, 299
- Zhu, Z., Hartmann, L., Nelson, R. P., & Gammie, C. F. 2012, *ApJ*, 746, 110
- Zúñiga-Fernández, S., Bayo, A., Elliott, P., et al. 2021, *A&A*, 645, A30
- Zuckerman, B., & Song, I. 2004, *ARA&A*, 42, 685
- Zuckerman, B., Song, I., & Bessell, M. S. 2004, *ApJ*, 613, L65
- Zuckerman, B., Song, I., Bessell, M. S., & Webb, R. A. 2001a, *ApJ*, 562, L87
- Zuckerman, B., Song, I., & Webb, R. A. 2001b, *ApJ*, 559, 388
- Zuckerman, B., & Webb, R. A. 2000, *ApJ*, 535, 959

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICE A. TABLAS DE DATOS

Tabla A.8: Compañeros en AB Doradus (NEW): objetos no conocidos y encontrados en el presente trabajo. (NC): objetos conocidos pero no catalogados como compañeros. (NF): objetos no fotométricos. (*): Fotometría no resuelta.

Table with columns: NAME, Ang. Sep. (arcsec), Real Sep. (UA), RA, DEC, PLX (mas), PMRA (mas/yr), PMDEC (mas/yr), RV (km/s), Gmag, Jmag, Mass (Ms), Sp. Type. Rows include various stars like * del ScI, HD 223340, [LM84] 5-12, etc.

