

**Diagramas Hertzsprung-Russell de cúmulos  
estelares en la Vía Láctea a partir de Gaia Data  
Release 3**



*Proyecto de Grado*

*Autora:*

María Angélica Medina Botero

*Proyecto dirigido por:*

Beatriz Sabogal

Bogotá, D.C. - Colombia

25 de mayo de 2023

## *Resumen*

Desde tiempos antiguos, el ser humano ha levantado la vista hacia el cielo nocturno y se ha maravillado con sus observaciones. A través del estudio de los cuerpos celestes los astrónomos han sido capaces de comprender muchos aspectos del universo que antes eran desconocidos. A pesar de que todavía hay mucho por descubrir, la astronomía nos ha permitido comprender que nuestro planeta es solo un pequeño punto azul que gira alrededor de una estrella en un brazo de una galaxia espiral conocida como la Vía Láctea. Estudiar nuestra propia galaxia, su origen, evolución y desarrollo, nos permite entender nuestro universo.

Una de las formas de estudiar la Vía Láctea es mediante el análisis de diagramas Hertzsprung-Russell, que permiten el estudio de estrellas según su ubicación en los mismos. Los cúmulos estelares son un ejemplo de este tipo de estudios. Tales objetos son estructuras formadas por muchas estrellas que están ligadas entre sí debido a la gravedad y que tienen un origen común. Al ubicar estos cúmulos en el diagrama HR, es posible entender la evolución de la galaxia en la que se encuentran.

En este proyecto se construyeron múltiples diagramas Hertzsprung-Russell para, a partir de la ubicación de las estrellas de cada cúmulo, analizar sus etapas evolutivas. A la vez, se llevó esto a cabo buscando actualizar el diagrama de Sandage (1958), ampliamente usado en la astronomía, por lo cual se usaron los mismos cúmulos implementados por este, junto con otros nueve cúmulos más.

## *Abstract*

Since ancient times, human beings have looked up at the night sky and marveled at their observations. Through the study of celestial bodies, astronomers have been able to understand many aspects of the Universe that were previously unknown.

Although there is still much to discover, astronomy has allowed us to comprehend that our planet is just a small blue dot revolving around a star in one of the arms of a spiral galaxy known as the Milky Way. Studying our own Galaxy, its origin, evolution, and development, enables us to understand our Universe.

One way to study the Milky Way is through the analysis of Hertzsprung-Russell diagrams, which allow the study of stars based on their location within them. Stellar clusters are an example of this type of study. Such objects are structures formed by many stars that are bound together by gravity and have a common origin. By placing these clusters on the Hertzsprung-Russell diagram, it is possible to understand the evolution of the galaxy in which they reside.

In this project, multiple Hertzsprung-Russell diagrams were constructed to analyze the evolutionary stages of each cluster's stars based on their location. Additionally, this was carried out with the aim of updating the Sandage Hertzsprung-Russell diagram (1958), widely used in astronomy, for which the same clusters implemented by Sandage were used, along with nine additional clusters.

## *Agradecimientos*

*Alcen los ojos y miren a los cielos: ¿Quién ha creado todo esto? El que ordena la multitud de estrellas una por una, y llama a cada una por su nombre. ¡Es tan grande su poder, y tan poderosa su fuerza, que no falta ninguna de ellas! - Isaías 40:26-28*

Mis logros no son solo míos, son de todas las personas que me han apoyado en este proceso que ha estado lleno de retos, alegrías y, sobre todo, aprendizaje. Quiero agradecer primero a Dios por ser mi brújula en el camino y por poner a gente tan increíble a mi lado. A mi familia: Vale, Andre, Carli, mi abuelito Nereo, mis padres Angélica y Carlos, y a mi perro Apolo. Ustedes son mi razón de vivir. Gracias a José, mi primo y hermano, quien me motivó a estudiar en Los Andes y quien creyó en mí.

A Sara, la hermana que me dio la vida.

A Brayan, mi primer amigo en la universidad y que hoy en día puedo decir con mucho orgullo que sigue siéndolo.

A Daniela, Juanca, Jesús, Emily, Santi, Alix y Carlos, quienes siempre me han sacado una sonrisa en los momentos difíciles y también han llorado conmigo. Soy muy afortunada de contar con ustedes.

Agradezco a mi familia del 1202: Gunne, Brayner y Rubén. Llegaron cuando más los necesitaba y me hicieron sentir como en casa. Al volver a casa, nuestra casa, no me siento sola.

Doy gracias por toda la gente de física que me adoptó cuando me sentía sola y cuando pensé que no iba a tener más amigos. No solo fueron mis amigos, sino también mis profesores y consejeros.

Estoy eternamente agradecida con la profesora Beatriz Sabogal, quien ha sido muy paciente y comprensiva. Me ha brindado su apoyo y en muchas ocasiones sus palabras me han animado a seguir. Ha sido luz en momentos duros y fue un honor trabajar con ella. Me ha enseñado mucho. También agradezco al profesor Alejandro García por su orientación y amabilidad, al igual que al grupo de astronomía por responder siempre mis dudas. Por último, pero no menos importante, a Indi por toda su ayuda desde el primer día.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Índice general</b>	<b>1</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>3</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>6</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>8</b>
2.1. Cúmulos estelares . . . . .	8
2.2. Movimientos propios . . . . .	10
2.3. Diagrama Hertzsprung-Russell . . . . .	13
2.4. Gaia DR3 . . . . .	16
<b>3. Metodología</b>	<b>20</b>
3.1. Selección de cúmulos . . . . .	20
3.2. Descarga de datos . . . . .	20
3.3. Determinación de pertenencia . . . . .	21
3.4. Creación de los diagramas HR . . . . .	23
3.4.1. Determinación de magnitudes . . . . .	23
<b>4. Resultados y análisis</b>	<b>26</b>
4.0.1. Secuencia principal . . . . .	32
4.0.2. Secuencia de gigantes . . . . .	34
4.1. Nebulosas planetarias . . . . .	36
4.2. Secuencia de enanas blancas . . . . .	37
<b>5. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>39</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	39
5.2. Trabajo futuro . . . . .	40

<b>Referencias</b>	<b>45</b>
<b>Apéndices</b>	<b>45</b>

# Índice de figuras

2.1.	Comparación entre cúmulo globular y abierto . . . . .	9
2.2.	Sistema de coordenadas ecuatoriales . . . . .	10
2.3.	Componentes de la velocidad para un cuerpo celeste. . . . .	11
2.4.	Diagrama de movimientos propios en unidades de milisegundos de arco por año (mas/yr) para Pesebre con datos del catálogo PPMLX. . . . .	12
2.5.	Diagrama Hertzsprung-Russell . . . . .	14
2.6.	Diagrama HR de Sandage (1958) . . . . .	15
2.7.	Proceso del satélite Gaia . . . . .	17
2.8.	Sistema fotométrico de Gaia DR3 . . . . .	18
2.9.	Sistema fotométrico Johnson-Cousins (UBVRI). . . . .	18
2.10.	Relación entre el sistema fotométrico UBVRI de Johnson-Cousins y el sistema de Gaia. . . . .	19
3.1.	Histogramas de movimientos propios . . . . .	22
3.2.	Gráfica de movimientos propios para las Pléyadas . . . . .	22
3.3.	Histograma de movimientos propios para M3 . . . . .	23
3.4.	Gráfica de movimientos propios para M3 . . . . .	23
3.5.	Diagrama HR para las Pléyadas . . . . .	25
3.6.	Diagrama HR para M3 . . . . .	25
4.1.	Diagrama tipo Sandage. . . . .	27
4.2.	Diagrama HR para M11. . . . .	27
4.3.	Diagrama HR de los cúmulos globulares. . . . .	28
4.4.	Diagrama HR de los cúmulos abiertos. . . . .	29
4.5.	Diagrama HR para NGC 2244. . . . .	29
4.6.	Diagrama HR para NGC 6823. . . . .	30
4.7.	Diagrama HR para las Pléyadas y Coma Berenice. . . . .	31
4.8.	Diagrama HR para M41, M67 y NGC 752. . . . .	31
4.9.	Diagrama HR para las Híades y Pesebre . . . . .	33
4.10.	Estrellas rezagadas azules . . . . .	33
4.11.	Rama de gigantes en los diagramas HR . . . . .	34
4.12.	Nebulosas planetarias . . . . .	37
1.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para NGC 2362. . . . .	46
2.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para NGC 2362. . . . .	46
3.	Diagrama HR para NGC 2362. . . . .	46
4.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M67. . . . .	47
5.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M67. . . . .	47

6.	Diagrama HR para M67 . . . . .	47
7.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para NGC 752 . . . . .	48
8.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para NGC 752 . . . . .	48
9.	Diagrama HR para NGC 752 . . . . .	48
10.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para pesebre . . . . .	49
11.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para pesebre . . . . .	49
12.	Diagrama HR para pesebre . . . . .	49
13.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para La Híades . . . . .	50
14.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para La Híades . . . . .	50
15.	Diagrama HR para Las Híades . . . . .	50
16.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M41 . . . . .	51
17.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para M41 . . . . .	51
18.	Diagrama HR para M41 . . . . .	51
19.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para Coma Berenice . . . . .	52
20.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para Coma Berenice . . . . .	52
21.	Diagrama HR para Coma Berenice . . . . .	52
22.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para h y $\chi$ Persei . . . . .	53
23.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para h y $\chi$ Persei . . . . .	53
24.	Diagrama HR para h y $\chi$ Persei . . . . .	53
25.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M92 . . . . .	54
26.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para M92 . . . . .	54
27.	Diagrama HR para M92 . . . . .	54
28.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M13 . . . . .	55
29.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para M13 . . . . .	55
30.	Diagrama HR para M13 . . . . .	55
31.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M5 . . . . .	56
32.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para M5 . . . . .	56
33.	Diagrama HR para M5 . . . . .	56
34.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M12 . . . . .	57
35.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para M12 . . . . .	57
36.	Diagrama HR para M12 . . . . .	57
37.	Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M30 . . . . .	58
38.	Diagrama de movimientos propios en RA y DEC para M30 . . . . .	58
39.	Diagrama HR para M30 . . . . .	58

# Índice de cuadros

3.1. Cúmulos abiertos y sus características . . . . .	24
3.2. Cúmulos globulares y sus parámetros . . . . .	24

# Capítulo 1

## Introducción

Un cúmulo estelar es la agrupación de muchas estrellas que presentan un origen común y que están unidas gravitacionalmente, permitiendo estudiar la evolución de las mismas. Estos grupos pueden contener desde decenas hasta cientos de miles de estrellas y, debido a su formación en una misma nube molecular, tienen composiciones casi idénticas ([Carroll & Ostlie, 2017](#)). La astronomía cuenta con herramientas para estudiar estas agrupaciones en conjunto y brindar información sobre la galaxia hospedadora, este es el caso de los diagramas Hertzsprung-Russell (HR), mediante los cuales es posible analizar la relación entre el índice de color y la magnitud absoluta de las estrellas presentes en los cúmulos. La ubicación de estos cuerpos celestes en el diagrama HR depende de la masa inicial y de la edad. Así, según la zona en la que se encuentre la estrella, se conoce su tipo espectral, temperatura, magnitud, etapa evolutiva, luminosidad y otros factores. Por este motivo, los cúmulos de estrellas son ampliamente usados para el análisis de la evolución estelar.

Durante el siglo XIX, Ejnar Hertzsprung y Henry Norris Russell estudiaron de manera independiente la magnitud absoluta en relación al tipo espectral de las estrellas obteniendo como resultado el diagrama HR. Al contrario de lo esperado, en este diagrama las estrellas se disponen, en su mayoría, en una franja diagonal conocida como secuencia principal. A la vez, existen otras zonas conformadas por estrellas gigantes, supergigantes, enanas blancas, subgigantes y subenanas que se presentan alrededor de la secuencia principal. Un diagrama HR importante para la astronomía, es el realizado por Allan Sandage en 1958. Este gráfico está compuesto por un total de 11 cúmulos: 10 abiertos y 1 globular. Debido a la época en la que fue realizado, el diagrama no está compuesto por puntos que simbolicen estrellas sino por líneas que siguen el comportamiento de cada cúmulo. Anteriormente, no se tenía acceso a grandes bases de datos para generar este tipo de diagramas con precisión y detalle. No obstante, gracias a las misiones espaciales, en la actualidad se dispone de una extensa cantidad de datos, lo que ha beneficiado significativamente los estudios de evolución estelar. La

misión Gaia y en específico su base de datos DR3, contiene la solución astrométrica completa -posición en el cielo (ascensión recta y declinación), paralaje y movimientos propios- para alrededor de  $1.468 \times 10^9$  fuentes ([ESA, 2022a](#)).

Teniendo esto en cuenta, en este trabajo se generan diagramas HR con datos de Gaia DR3 para 12 cúmulos abiertos y 6 globulares presentes en la Vía Láctea, incluyendo los 11 cúmulos del diagrama de Sandage (1958). Para esto, se requiere establecer las estrellas pertenecientes a cada cúmulo abierto y globular seleccionado. A su vez, determinar el color y la magnitud absoluta para las estrellas, obtener los diagramas HR de cada cúmulo y analizar su evolución estelar. Asimismo, se genera un diagrama HR similar al obtenido por Allan Sandage usando la fotometría de Gaia.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Cúmulos estelares

Los cúmulos estelares nacen incrustados dentro de nubes moleculares gigantes y durante su formación y evolución temprana a menudo solo son visibles en longitudes de onda infrarrojas, debido a los efectos de la extinción estelar ([Lada & Lada, 2003](#)). Gracias a su formación en la misma nube, las estrellas pertenecientes a cada cúmulo comparten características como la edad, y composición química, lo que resulta de gran utilidad para estudios de evolución estelar. Los cúmulos estelares se mantienen unidos gracias a la atracción gravitatoria entre sus miembros, lo que condiciona su evolución según las leyes del movimiento y la gravedad de Newton; por lo tanto, los cúmulos son un valioso campo de pruebas para estudiar la dinámica estelar ([Lada & Lada, 2003](#)).

Existen dos clases de cúmulos: globulares y abiertos. Los cúmulos globulares contienen un aproximado de  $10^5$  estrellas, distribuidas de manera esférica y simétrica, con densidades centrales 10 veces más grandes que en los cúmulos abiertos ([Karttunen et al., 2007](#)). En la Vía Láctea hay aproximadamente 220 cúmulos globulares, un número pequeño si se compara con el total en galaxias como Andrómeda, que oscila entre 600 y 700 cúmulos globulares ([Minniti & Navarro, 2019](#)). Por otro lado, los cúmulos abiertos presentan menor concentración de estrellas, desde decenas hasta cientos de miembros.

En la Vía Láctea se han descubierto cerca de 1100 cúmulos abiertos y se cree que hay más ([ESA/Hubble, 2021a](#)). Una de las diferencias entre los dos tipos de cúmulos es la cantidad de estrellas existentes en cada uno, la Figura 2.1 ejemplifica este hecho. Otra diferencia es que las estrellas en los cúmulos abiertos son, por lo general, jóvenes, mientras que en los globulares las estrellas son más antiguas.

Los cúmulos abiertos se encuentran en galaxias irregulares y en galaxias espirales, siendo este último el caso de la Vía Láctea. Están ubicados en el disco de la galaxia, a diferencia de los cúmulos globulares que se ubican en el halo, es decir, las zonas externas de la galaxia.



FIGURA 2.1: En el panel de la izquierda, Messier 15, un cúmulo globular ubicado en la constelación Pegaso, uno de los cúmulos conocidos con mayor densidad de estrellas. En el panel de la derecha se encuentra NGC 2164, un cúmulo abierto localizado dentro de La Gran Nube de Magallanes. Se evidencia mayor densidad estelar en el cúmulo globular. Imágenes originales por ESA/Hubble (M. Kornmesser). Adaptado de [ESA/Hubble \(2021b\)](#).

La disposición de los cúmulos estelares ha sido de gran utilidad para la investigación de la estructura de la Vía Láctea. En este sentido, la ubicación de los cúmulos abiertos brinda información sobre la formación reciente de estrellas en la galaxia y la distribución de los cúmulos globulares ha permitido fijar el tamaño de nuestra galaxia, determinar la posición del centro galáctico y constatar la existencia de un halo ([Lada & Lada, 2003](#)). El estudio de la distribución espacial y de la edad de los cúmulos abiertos más antiguos nos brinda información acerca de los procesos de formación y destrucción que han permitido que un número significativo de cúmulos sobreviva hasta nuestros días ([Friel, 1995](#)).

Las estrellas presentes en los cúmulos pueden ser examinadas mediante un diagrama magnitud-color o su versión análoga, el diagrama HR, que permite observar la relación entre la temperatura y la luminosidad de las estrellas. La ubicación de las mismas en el diagrama depende de factores como la masa inicial, edad, composición química y otros efectos involucrados, posibilitando el análisis de la estructura estelar y los estudios evolutivos ([Babusiaux et al., 2018](#)). Al resolver estrellas individuales, colocarlas en un diagrama magnitud color proporciona el método más directo para determinar las propiedades del cúmulo ([Krumholz et al., 2019](#)).

## 2.2. Movimientos propios

El sistema de coordenadas ecuatorial, mostrado en la Figura 2.2, permite ubicar los astros en la esfera celeste teniendo en cuenta la posición del equinoccio vernal ( $\gamma$ ) y el ecuador celeste. NCP y SCP corresponden a los polos celestes norte y sur, respectivamente. La ascension recta  $\alpha$  (RA) se mide en horas, minutos y segundos sobre la línea del ecuador celeste, desde  $\gamma$  hasta la intersección con el círculo horario del objeto. Una RA de 24 horas corresponde a la circunferencia completa, es decir, 360 grados, implicando así que cada hora equivale a 15 grados, basándose en las 24 horas (tiempo sidéreo) necesarias para que un objeto cruce dos veces consecutivas el meridiano local del observador (Carroll & Ostlie, 2017). La declinación  $\delta$  (DEC), en cambio, es el ángulo hacia el norte o el sur, medido desde el ecuador celeste, ocasionando que en el primer caso sea positivo y en el segundo, negativo.

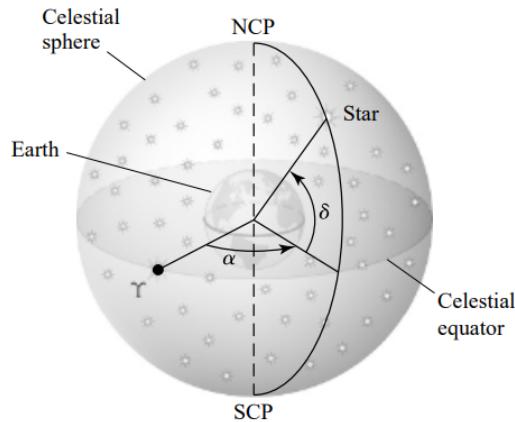


FIGURA 2.2: Sistema de coordenadas ecuatorial. RA y DEC están representados por  $\alpha$  y  $\delta$  respectivamente. Tomado de Carroll & Ostlie (2017).

Debido a los movimientos intrínsecos de los cuerpos celestes, las coordenadas pueden presentar variaciones. No solo el cambio en el paralaje anual contribuye a esto, sino también los movimientos propios, causados por el movimiento relativo del Sol y las estrellas en el espacio, y que se evidencia en el desplazamiento de las estrellas hacia una dirección constante (Karttunen et al., 2007). Estos cambios angulares en las coordenadas están asociados con la velocidad de la estrella. Como se muestra en la Figura 2.3, puede descomponerse en velocidad radial  $V_r$  (en la dirección de la línea de visión) y en velocidad transversal  $V_\Theta$  (perpendicular a la otra componente).

El movimiento propio total  $\mu$  está dado por:

$$\mu = \sqrt{\mu_\alpha^2 \cos^2 \delta + \mu_\delta^2}, \quad (2.1)$$

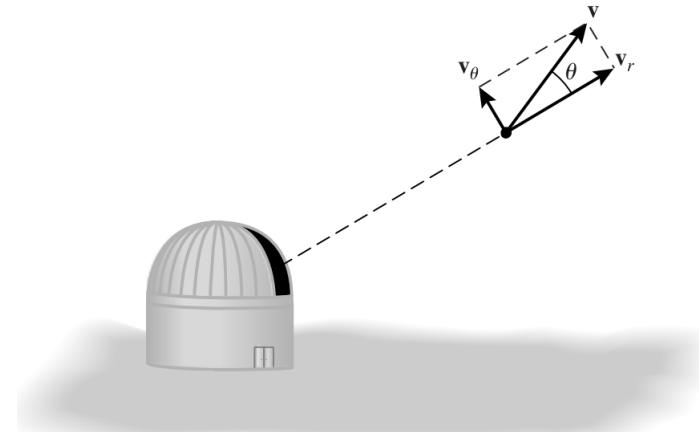


FIGURA 2.3: Componentes de la velocidad  $V$  para un cuerpo celeste.  $V_\theta$  es la velocidad transversal y  $V_r$  la velocidad radial. Tomado de [Carroll & Ostlie \(2017\)](#)

Donde  $\mu_\alpha$  corresponde al movimiento propio en RA y  $\mu_\delta$  al movimiento propio en DEC. Al pasar de la coordenada  $(\alpha_1, \delta_1)$  a la coordenada  $(\alpha_2, \delta_2)$  en un cierto tiempo, los movimientos propios en cada dirección, medidos en segundos de arco por año, se definen como:

$$\mu_\alpha = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\Delta t} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}, \quad (2.2)$$

$$\mu_\delta = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\Delta t} = \frac{\Delta\delta}{\Delta t}. \quad (2.3)$$

Los miembros de cada cúmulo presentan movimientos propios en común a causa de que están ligados gravitacionalmente, permitiendo que un diagrama de movimientos propios y su análisis sea una herramienta útil para identificar pertenencia a los cúmulos. Debido a que los errores son la principal fuente de dispersión de estrellas de cúmulos en los diagramas de movimiento propio, su distribución es similar a una gaussiana ([Murdin, 2001](#)). Estos hechos son implementados para realizar pertenencia a partir de ajustes gaussianos a los movimientos propios en RA y DEC. Es importante mencionar que existe un método más adecuado para estudiar la pertenencia de estrellas a un cúmulo estelar, y es el método de máxima verosimilitud, en el cual se estiman los parámetros del modelo que describe las propiedades de las estrellas en un cúmulo. Con estos parámetros se determinan las probabilidades de pertenencia para todas las estrellas que se encuentran en el diagrama de movimientos propios de los cúmulos ([Alfonso et al., 2019](#)). Debido a la complejidad de este método, para este trabajo se realizó la pertenencia a cada cúmulo teniendo en cuenta los parámetros obtenidos al hacer ajustes gaussianos en los histogramas de movimientos propios para cada coordenada. Este proceso permite identificar la mayoría de las estrellas asociadas a cada cúmulo, pero puede involucrar estrellas que pertenecen al campo estelar o dejar fuera algunos miembros reales, lo

que implica que no sea completamente preciso. Sin embargo, para los propósitos específicos de este proyecto, cumple su objetivo.

En la Figura 2.4 se observa el diagrama de movimientos propios para el cúmulo abierto NGC 2632 ([Wang et al., 2014](#)), también conocido como Pesebre. Se evidencia la presencia de dos distribuciones, la de las estrellas del campo (agrupación más grande centrada en (0,0)) y la del cúmulo (pequeño grupo de estrellas a la derecha). Gracias a la cercanía de NGC 2632, los movimientos propios del cúmulo son mayores a los del campo y se exhibe esta separación entre ambas distribuciones. A medida que un cúmulo está más lejos, estas distribuciones se presentan como una sola.

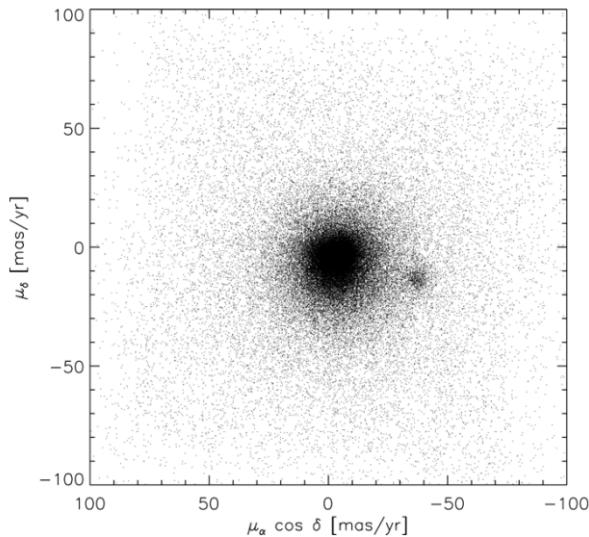


FIGURA 2.4: Diagrama de movimientos propios para Pesebre con datos de PPMLX. Tomado de [Wang et al. \(2014\)](#).

En el caso de los cúmulos abiertos más lejanos, al igual que en los globulares, las incertidumbres en la medición individual del paralaje y el movimiento propio no son despreciables y se traducen en errores mayores en la distancia ([Vasiliev, 2019](#)). La interacción gravitacional en los cúmulos ocasiona que los miembros más brillantes y pesados se agrupen en el centro, mientras que los más ligeros se mueven hacia afuera ([Spitzer & Shull, 1975](#)). Al determinar pertenencia a un cúmulo estelar se pueden presentar limitaciones en cuanto a profundidad y cobertura del cielo, causando que en algunos casos se cubran zonas amplias, pero solo se seleccionen las estrellas más brillantes y masivas ([Wang et al., 2014](#)).

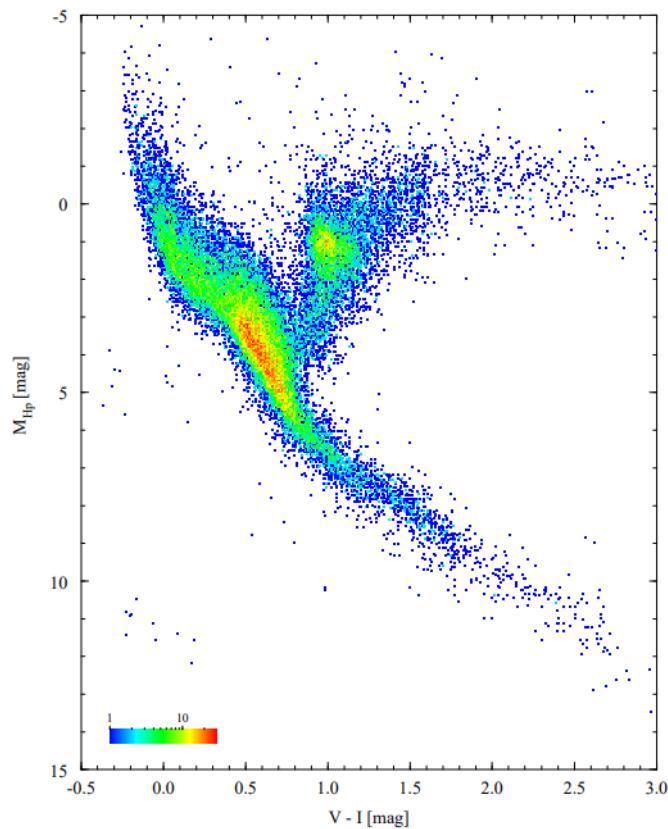
### 2.3. Diagrama Hertzsprung-Russell

A partir de la observación de una estrella se pueden inferir dos de las propiedades más importantes, la temperatura y la luminosidad (Prialnik, 2000). Relacionar ambas en una gráfica, permite categorizar las estrellas y estudiar sus etapas evolutivas. El diagrama HR se generó por primera vez en el siglo XX. Por un lado, en el año 1905, Ejnar Hertzsprung publicó un artículo llamado “Sobre la radiación de las estrellas”, cuya continuación fue publicada en 1907. Siendo estas sus primeras contribuciones al diagrama HR (Strand, 1977), Hertzsprung logró relacionar la luminosidad de las estrellas con su tipo espectral, al tiempo que estudió paralajes y magnitudes absolutas de estos objetos. De manera independiente, en el año 1913, Henry Norris Russell pudo calcular luminosidades de estrellas gracias a datos de paralaje estelar y graficó estos datos en función del tipo espectral (Russell, 1979). Hertzsprung y Russell notaron que para obtener conclusiones apropiadas, no era suficiente la magnitud aparente y era necesario realizar este diagrama con la magnitud absoluta, conociendo la respectiva distancia de las estrellas, lo cual permite ordenarlas de manera correcta en el diagrama HR (Langer & Kudritzki, 2014).

Las estrellas, como se muestra en la Figura 2.5, se pueden ubicar principalmente en 3 regiones: la secuencia principal (SP), la zona de gigantes (dividida en gigantes, gigantes rojas y supergigantes) y la zona de enanas y enanas blancas. La mayoría de estrellas se encuentran en la secuencia principal, rama diagonal del diagrama, donde pasan gran parte de su vida quemando hidrógeno. A medida que pasa el tiempo, se agota el hidrógeno y las estrellas empiezan a quemar elementos más pesados. De esta manera, los cúmulos estelares pierden a las estrellas más brillantes de su secuencia principal, lo que da lugar a la aparición de la rama de gigantes rojas y la rama horizontal (Pols, 2011). Esta zona está sobre la parte derecha de la SP y las estrellas se caracterizan por tener temperaturas superficiales bajas y luminosidades altas. La rama horizontal, con magnitud visual cercana a cero, es casi horizontal en el diagrama HR. Existe una conexión significativa entre la distribución de color de las estrellas en la rama horizontal de los cúmulos globulares de nuestra galaxia: los cúmulos con baja metalicidad presentan una rama horizontal mayormente azul (RHA), mientras que los cúmulos con alta metalicidad exhiben una rama horizontal roja y compacta (RHR) (Rich et al., 1997). La rama asintótica surge desde la rama horizontal y se dirige hacia el extremo luminoso de las gigantes rojas. Las estrellas de menor masa y mayor contenido de metales, que experimentan la fusión del núcleo de helio, muestran tonalidades más rojizas debido al aumento de la opacidad con la metalicidad (Hansen et al., 2012), resultando una agrupación en la zona de gigantes rojas llamada agrupamiento rojo, más frecuentemente llamada red clump por su nombre en inglés. Estas estrellas se consideran como el equivalente de las estrellas de la rama horizontal en poblaciones con alta concentración de metales, ofreciendo la

oportunidad de estudiar estructuras con alta metalicidad, como el bulbo galáctico ([Stanek et al., 1994](#)).

Estas ramas indican diversas etapas de la evolución de las estrellas, y su ubicación en el diagrama HR está determinada por la masa y la composición química de las mismas ([Karttunen et al., 2007](#)). La densidad de estrellas en una zona indica que pasan gran parte de su tiempo de vida ahí. El paso de las estrellas desde la SP hasta la zona de gigantes se hace de manera relativamente rápida, en comparación con el tiempo que duran en otras regiones, por esto hay una zona con poca población estelar a la derecha de la SP conocida como brecha de Hertzsprung, más frecuentemente llamada gap de Hertzsprung por su nombre en inglés. Por otro lado, en la esquina inferior izquierda se encuentran las enanas blancas, esta zona corresponde a la fase final de evolución de las estrellas con masa baja o media.



**FIGURA 2.5:** Diagrama de Hertzsprung-Russell para estrellas individuales del Catálogo Hiparcos. En el eje x se presenta el índice de color  $V - I$  y en el eje y, la magnitud visual  $M_{H_p}$ . Los colores indican el número de estrellas en una celda de 0.01 mag en  $(V-I)$  y 0.05 mag en magnitud visual  $M_{H_p}$ . Tomado de ([ESA, 2023](#)).

Debido a la utilidad de este diagrama, [Sandage \(1958\)](#) produjo uno con 11 cúmulos situados en la Vía Láctea: 10 abiertos y 1 globular. Este diagrama HR, mostrado en la Figura 2.6, ha sido usado como base para cálculos de distancias de cúmulos estelares, y es fundamental para el entendimiento de la evolución estelar en nuestra galaxia. Aquí radica la importancia de enriquecer este diagrama con datos actuales.

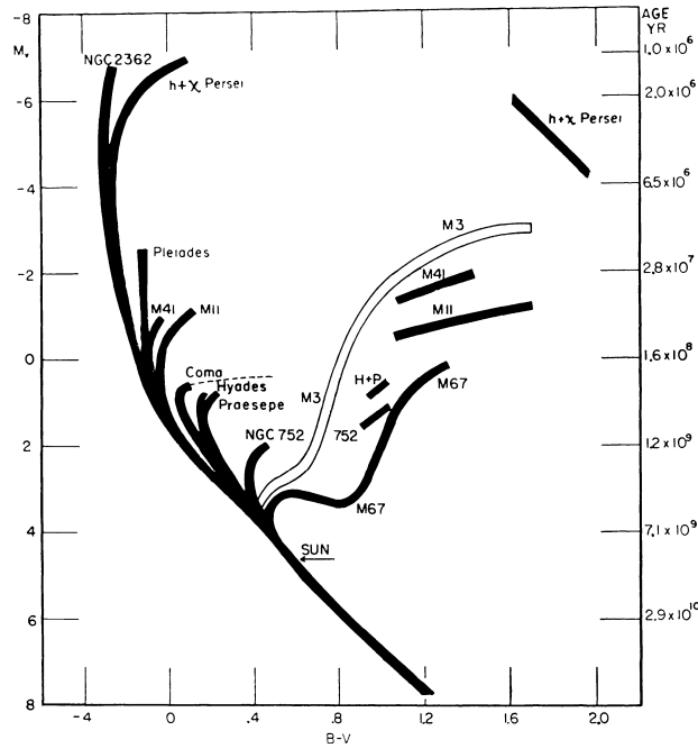


FIGURA 2.6: Diagrama HR de 10 cúmulos abiertos y 1 cúmulo globular ubicados en la Vía Láctea, realizado por Allan Sandage (1958). En el eje X se presenta el índice de color B-V y en el eje Y la magnitud absoluta en visual. Tomado de [Sandage \(1958\)](#)

Como se muestra en la Figura 2.6, se encuentran graficados los datos de magnitud absoluta visual  $M_V$  y color (B-V) para los cúmulos abiertos NGC 2362, h y  $\chi$  Persei, las Pléyades, M41, M11, M67, NGC 752, Coma Berenices, las Híades y NGC 2632, así como el cúmulo globular M3, ubicado en la constelación Canes Venatici. En cada cúmulo presente en el diagrama, la pendiente de la SP se vuelve más empinada a medida que se pasa al siguiente cúmulo más brillante. Esto resulta de la evolución estelar y es evidencia de la diferencia de edad entre los cúmulos. A la vez, las estrellas están distribuidas continuamente a lo largo de esta SP debido a la función inicial de masa. Se evidencia, para los cúmulos más brillantes que M67, el gap de Hertzsprung. Esto indica que las estrellas más calientes y masivas evolucionaron rápidamente respecto a las más frías y de baja masa. Una vez se alcanza un índice de color igual a 1, las estrellas pasan un tiempo considerable en la zona de gigantes. El ancho del gap de Hertzsprung en el primer cúmulo en aparecer en la SP, M67, es de 0. A medida que pasamos al siguiente cúmulo, el ancho va en aumento, hasta llegar al cúmulo h +  $\chi$  Persei, con un ancho de aproximadamente 1,5 magnitudes. A pesar de que M67 es un cúmulo mucho más antiguo que el cúmulo doble de Perseo, las estrellas en este último, en general, son más masivas que en M67. Por esto, el ancho del gap de Hertzsprung parece tener una relación con la masa. Cabe resaltar que la secuencia principal se dobla hacia arriba para los cúmulos con masas menores a  $3M_{\odot}$ , como en el caso de NGC 752 y M67.

Sabiendo que esta gráfica fue obtenida en el año 1958, cuando no se disponía de muchos datos, surge la necesidad de complementar este diagrama con nuevos datos que permitan observar mejor las secuencias definidas y las zonas de turn-off que permiten calcular las edades y distancias. La gran cantidad de información de las misiones espaciales, como es el caso de Gaia, permite cumplir este objetivo.

## 2.4. Gaia DR3

Gaia es un censo estelar masivo que brinda datos de observación en aras de estudiar problemas asociados con la estructura, origen y evolución de la Vía Láctea ([ESA, 2022b](#)). Su misión es la creación de un mapa tridimensional muy preciso de la Galaxia, para lo cual proporciona la solución astrométrica, incluida la posición, paralaje y movimientos propios de las fuentes y el tipo espectral para muchos objetos estelares ([ESA, 2022a](#)). Hasta el momento, se han liberado 4 bases de datos: Gaia Data Release 1, Gaia Data Release 2, Gaia Early Data Release 3 y Gaia Data Release 3 (GDR3). Esta última fue publicada el 13 de junio del 2022 y fue usada para el desarrollo de este proyecto.

La base de datos DR3 es reciente, por este motivo este trabajo se basa principalmente en el artículo realizado por [Babusiaux et al. \(2018\)](#) “Gaia Data Release 2: Diagramas Observacionales de Hertzsprung-Russell”, en el cual se utilizó una variedad de métodos para analizar diferentes poblaciones estelares, incluyendo estrellas del campo, así como las pertenecientes a múltiples cúmulos abiertos y globulares de la Vía Láctea. Esto permitió la generación de múltiples diagramas HR que abarcaron los distintos grupos de estrellas al tiempo que se estudiaron sus diferentes fases evolutivas. Así, se mostró la utilidad de analizar conjuntos de datos extensos para investigar la evolución estelar y las poblaciones estelares.

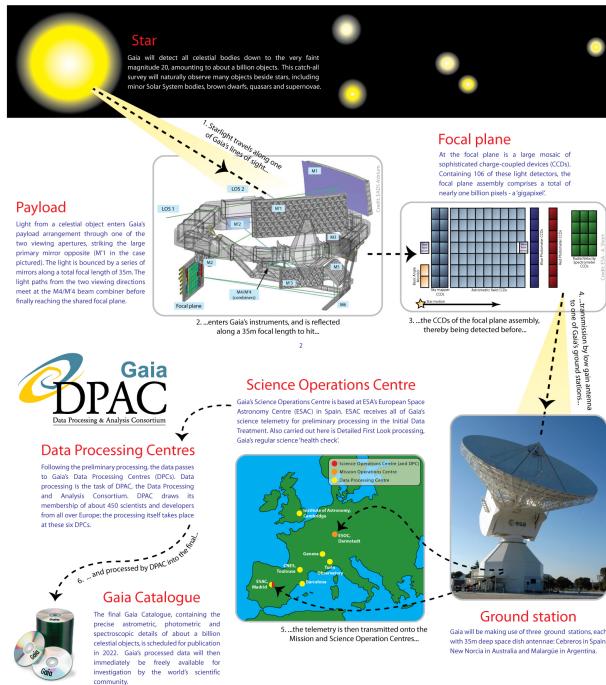


FIGURA 2.7: Visión general del proceso de obtención de datos realizado con Gaia, desde la identificación del objeto estelar hasta la llegada de la información y su respectivo almacenamiento. Tomado de [ESA \(2022b\)](#).

Gaia presenta 2 telescopios separados por un ángulo de 106,5° que forman imágenes en una única matriz de plano focal compartida de 106 CCDs (Rowell et al., 2021). Estos CCDs se dividen entre varios instrumentos para realizar las distintas mediciones. El satélite Gaia cuenta con tres instrumentos principales a bordo: el instrumento astrométrico que recopila imágenes en la banda de luz blanca G de Gaia (330-1050 nm), los fotómetros de prisma azul BP y rojo RP para espectros de baja resolución con rangos de longitud de onda de 330-680 nm y 640-1050 nm, respectivamente y, finalmente, el espectrómetro de Velocidad Radial (RVS) (Collaboration et al., 2018).

El proceso de obtención de datos es mostrado en la Figura 2.7. La adquisición de información se da a partir de la detección de objetos estelares con magnitud menor a 20, cuya luz entra por una de las aperturas de la sonda y sigue un camino de espejos hasta llegar al plano focal. El plano focal está conformado por múltiples CCDs que almacenan los datos para su posterior envío a las estaciones terrestres, donde se distribuye la información a los centros de operación y procesamiento de datos. Finalmente, los datos se suben al catálogo de Gaia y se encuentran disponibles para su estudio.

Gracias a Gaia, se han obtenido cientos de millones de mediciones de paralaje con la suficiente precisión para crear diagramas color-magnitud de alta calidad (Prusti et al., 2016), permitiendo así estudiar la evolución estelar de nuestra galaxia. A diferencia del sistema fotométrico usado por Sandage, el cual corresponde al sistema UBVRI de Johnson-Cousins,

Gaia DR3 usa un sistema fotométrico con magnitudes en verde, rojo y azul como se muestra en la Figura 2.8.

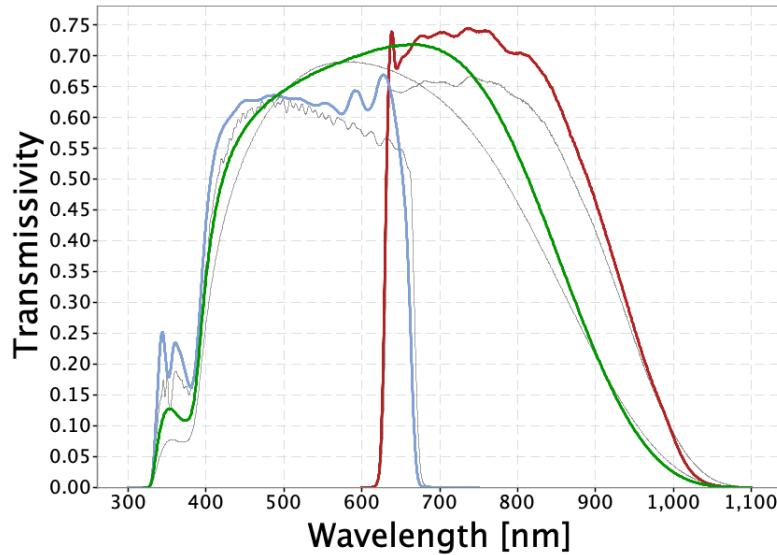


FIGURA 2.8: Las bandas de Gaia (E)DR3 producidas por la Unidad de Coordinación 5 del Consorcio de Procesamiento y Análisis de Datos de Gaia. Las líneas de color en la figura muestran los pasabandas G (línea verde), GBP (línea azul) y GRP (línea roja). Tomado de [Riello et al. \(2021\)](#).

Basado en el sistema fotométrico UBV de [Johnson \(1963\)](#), surgió el sistema UBVRI de Johnson-Cousins, mostrado en la Figura 2.9, el cual está conformado por 5 bandas anchas que van desde el ultravioleta (U) hasta el infrarrojo (I), pasando por la banda azul (B), la banda visual (V) y la roja (R).

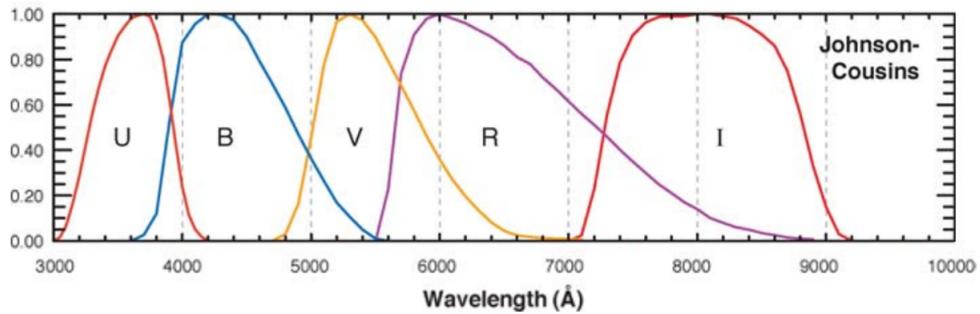


FIGURA 2.9: Esquema del sistema fotométrico UBVRI de Johnson-Cousins según la longitud de onda para cada banda. Adaptado de [Bessell \(2005\)](#).

En el sistema UBVRI, el punto cero de magnitud se estableció definiendo que Vega tiene colores de cero ([Bessell, 2005](#)). El hecho de que la magnitud V sea +0,03 significa que Vega tiene una magnitud de 0,03 en todas las bandas, es decir, se utilizó a Vega como una referencia estándar para establecer la escala de magnitudes en este sistema.

Para el sistema de Gaia, se ha establecido también la magnitud cero mediante la medición precisa del flujo de energía de Vega y para los filtros G,  $G_{BP}$ ,  $G_{RP}$  y  $G_{RVS}$  asumiendo

una magnitud de 0.03 para cada uno de ellos ([Jordi et al., 2010](#)). Aunque el sistema Gaia mide en longitudes de onda más cortas y no incluye una banda de infrarrojo cercano como el sistema UBVRI, afectando así la calibración y comparación de magnitudes en ciertos casos, las relaciones entre ambos sistemas pueden ser obtenidas a través de conversiones fotométricas (Figura 2.10).

Johnson-Cousins relationships	
$G - V = f(V - I)$	$-0.3 < V - I < 2.7$
$G_{BP} - V = f(V - I)$	$-0.3 < V - I < 2.7$
$G_{RP} - V = f(V - I)$	$-0.3 < V - I < 2.7$
$G_{BP} - G_{RP} = f(V - I)$	$-0.3 < V - I < 2.7$
$G - V = f(V - R)$	$-0.15 < V - R < 1.4$
$G - V = f(B - V)$	$-0.3 < B - V < 2.4$
$G - V = f(G_{BP} - G_{RP})$	$-0.5 < G_{BP} - G_{RP} < 2.75$
$G - R = f(G_{BP} - G_{RP})$	$-0.5 < G_{BP} - G_{RP} < 2.75$
$G - I = f(G_{BP} - G_{RP})$	$-0.5 < G_{BP} - G_{RP} < 2.75$

FIGURA 2.10: Relaciones entre el sistema fotométrico UBVRI de Johnson-Cousins y el sistema de Gaia ( $G$ ,  $G_{BP}$ ,  $G_{RP}$ ). Tomado de [Evans et al. \(2018\)](#)

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Selección de cúmulos

Con el fin de reproducir y actualizar el diagrama de Sandage (1958), se tomaron los mismos 11 cúmulos, correspondientes a: NGC 2362, h y  $\chi$  Persei, las Pléyades, M41, M11, M67, NGC 752, Coma Berenice, las Híades y el Pesebre, así como el cúmulo globular M3. A la vez, con el fin de realizar un diagrama más completo, se añadieron 5 cúmulos globulares: M13, M92, M12, M5 y M30, ya que en el diagrama de Sandage solo hay uno presente. Para concluir la selección de cúmulos, se incorporaron dos cúmulos abiertos adicionales, específicamente NGC6823 y NGC2244, con el propósito de realizar un monitoreo adicional a los mismos debido a que se caracterizan por estar embebidos o cercanos a nebulosas, lo cual los hace interesantes de estudiar en términos de sus diferencias con otros cúmulos estelares. De esta manera, se trabajaron 18 cúmulos de la Vía Láctea.

### 3.2. Descarga de datos

Este trabajo ha utilizado datos de la misión Gaia de la Agencia Espacial Europea (ESA) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), procesados por el Consorcio de Procesamiento y Análisis de Datos de *Gaia* (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). El financiamiento para el DPAC ha sido proporcionado por instituciones nacionales, en particular, las instituciones que participan en el Acuerdo Multilateral de *Gaia*.

A partir de la base de archivos de Gaia DR3 y usando una búsqueda con Astronomical Data Query Language (ADQL), reportada en el Apéndice 6, se descargaron los datos para 18 cúmulos estelares, 12 abiertos y 6 globulares. La información descargada está compuesta por el nombre de la fuente, sus coordenadas RA y DEC, paralajes, velocidades radiales,

movimientos propios en RA y DEC, magnitudes en rojo, azul y verde, y el correspondiente error para cada valor.

Para descargar estos datos, se implementó un radio de apertura de 3 minutos de arco para todos los cúmulos y un criterio de precisión relativa del 10 % para el error en el paralaje y los errores relativos de las magnitudes. En el caso de los cúmulos abiertos cercanos a nebulosas, como es el caso de NGC 6823 y NGC 2244, y en el caso del cúmulo abierto M11, fue necesario utilizar un criterio de error en el paralaje de 150 %, 100 % y 120 % respectivamente, para obtener las estrellas con un menor error en el paralaje y así, aumentar la probabilidad de que pertenecieran al cúmulo. De esta manera, se elimina la contaminación excesiva por estrellas del campo.

Al descargar los datos para cada cúmulo, se sumó 100 pársecs a su distancia teórica reportada previamente y con esta nueva distancia, se calculó el ángulo de paralaje correspondiente. Este ángulo sirvió como punto de referencia para evitar los datos de otras estrellas en la misma dirección pero con una posición diferente. De esta manera, no solo se evitó la descarga masiva de información irrelevante, sino que también se seleccionaron solo las estrellas dentro de la distancia de cada cúmulo sin eliminar a los miembros verdaderos.

### 3.3. Determinación de pertenencia

Una vez se tuvo la información de cada cúmulo, se realizó un procesamiento en Python con el fin de encontrar cuáles estrellas se pueden considerar como los miembros reales de cada cúmulo.

Para cada cúmulo se graficó el histograma de movimientos propios en RA (pmra) y en DEC (pmdec) y se hizo un respectivo ajuste gaussiano en cada caso. Para los cúmulos abiertos, se evidencian dos picos en cada gráfica: la distribución general, que corresponde a estrellas del frente y del fondo (pico más ancho), y la distribución del cúmulo (pico angosto). Esto se representa en la Figura 3.1, para las Pléyades. A partir del ajuste gaussiano, se tomaron las estrellas dentro de un radio de  $2,5\sigma$  para cada coordenada, obteniendo así las estrellas dentro de la gaussiana del cúmulo en RA y DEC. El catálogo final de miembros se obtuvo a partir de la correlación cruzada entre ambas listas.

Se escogió un radio de  $2,5\sigma$  con el objetivo de seleccionar los miembros pertenecientes al cúmulo. Con un radio menor, podrían no incluirse todas las estrellas del cúmulo y, por el contrario, con un sigma mayor, se incluía una gran cantidad de estrellas del campo, lo cual se hacía evidente en una amplia dispersión en el diagrama HR. Con el valor seleccionado, sigue habiendo estrellas de estas dos locaciones, sin quitar estrellas propias de cada cúmulo.

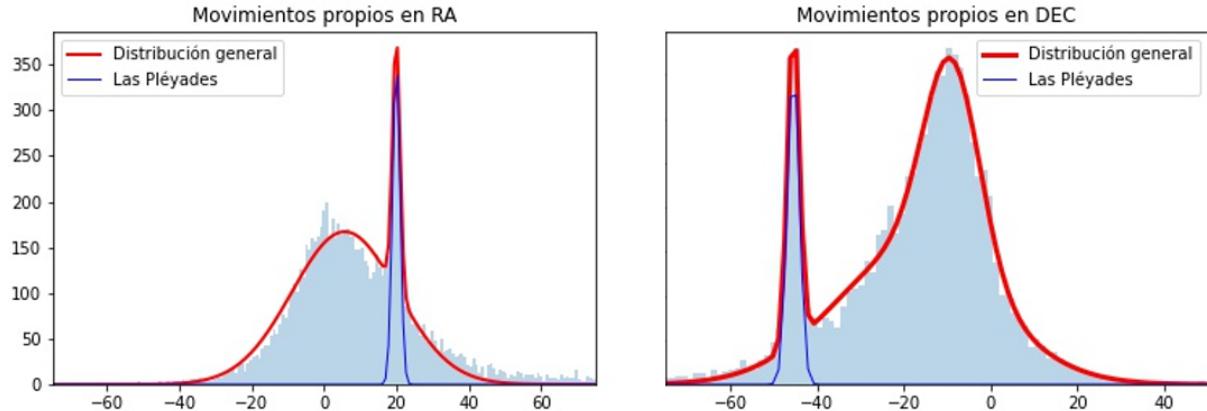


FIGURA 3.1: Histogramas de movimientos propios en RA y DEC con sus respectivos ajustes gaussianos para las Pléyades. La línea roja presenta la distribución general y la azul la gaussiana correspondiente al cúmulo abierto.

Es posible ver que la selección de estrellas dentro del ajuste corresponde aproximadamente al cúmulo deseado. En la Figura 3.2 se muestran las gráficas de movimientos propios para las Pléyades. En rojo está la distribución general de estrellas, es decir, las estrellas iniciales a las cuales se realizaron los filtros y ajustes, y en lila se muestra la selección final.

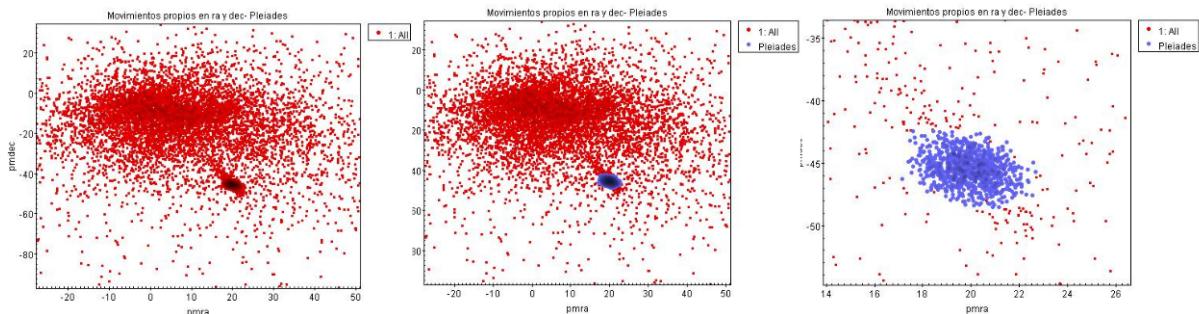


FIGURA 3.2: Gráficas de pmra vs pmdec para las Pléyades. A la izquierda, el conglomerado de estrellas inicial, en el medio, se observa la selección del cúmulo en lila sobre los datos iniciales (rojos) luego de los filtros y el ajuste gaussiano y a la derecha un acercamiento de esta selección final.

Este procedimiento se llevó a cabo para el resto de cúmulos, tanto abiertos como globulares, a excepción de que en los cúmulos globulares no se observan dos picos como en los abiertos sino un pico muy amplio debido a la forma de estos sistemas y a la gran cantidad de estrellas en los mismos, como se muestra en la Figura 3.3.

Una vez obtenidos los parámetros de los ajustes, fue posible encontrar los miembros del resto de cúmulos globulares, como se muestra en la Figura 3.4, siendo este el caso de M3. Para todos los cúmulos se trabajó encontrando pertenencia de acuerdo a un radio de  $2,5\sigma$ .

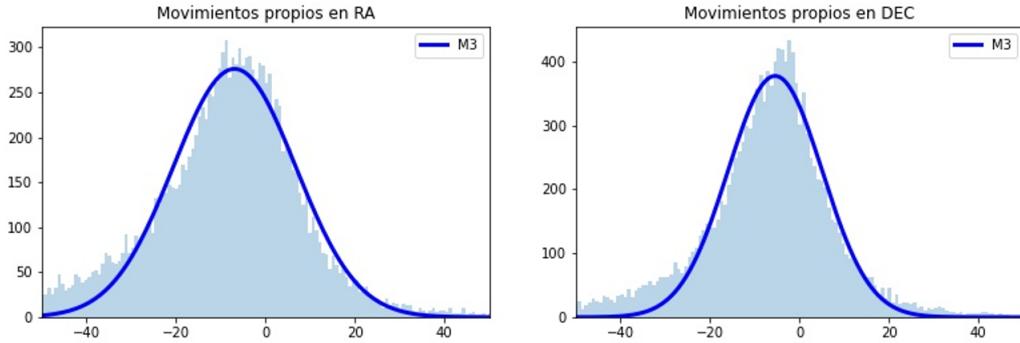


FIGURA 3.3: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para el cúmulo globular M3, también conocido como NGG5272. En azul se encuentra el histograma y la linea roja corresponde al ajuste gaussiano.

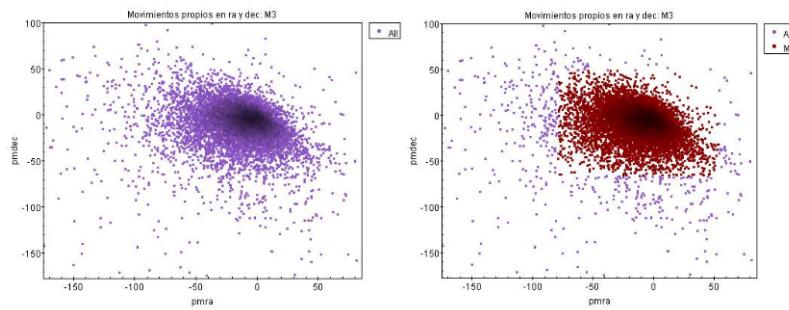


FIGURA 3.4: Gráfica de movimientos propios para el cúmulo globular M3, en morado la distribución inicial de estrellas y en rojo la selección final luego del filtrado y el ajuste.

## 3.4. Creación de los diagramas HR

### 3.4.1. Determinación de magnitudes

A partir de los miembros finales seleccionados en cada uno de los 18 cúmulos, fue posible graficar los diagramas magnitud-color, donde el índice de color se obtuvo mediante la diferencia entre las magnitudes en azul y en rojo ( $G_{BP} - G_{RP}$ ). En cuanto a la magnitud absoluta,  $M_G$ , fue posible encontrarla para cada estrella usando la magnitud  $G$  y según la ecuación 3.1, donde  $\varpi$  corresponde al paralaje. Teniendo en cuenta que el factor de la extinción no implica cambios significativos en los diagramas HR realizados, se ignoró este término.

$$M_G = G + 5 + 5\log_{10}(\varpi/1000), \quad (3.1)$$

En las Tablas 3.1 y 3.2 se encuentran listados los cúmulos abiertos y globulares, respectivamente, con sus correspondientes coordenadas RA y DEC, la distancia en pc a la que se encuentran, tomada de la base de datos astronómica SIMBAD ([Wenger et al., 2000](#)), y los miembros obtenidos con la metodología implementada.

Cúmulo	RA	DEC	Distancia (pc)	Miembros
Coma Berenice	186.75	23.90	86	45
NGC 752	29.22	37.79	400	296
Híades	67.45	16.95	47	396
M41	101.50	-20.72	705.18	627
Pesebre	130.05	19.62	187	830
Pléyades	56.60	24.11	136.2	913
M67	132.85	11.81	830	1097
h y $\chi$ Persei	34.74	57.13	2079	1214
NGC2362	109.67	-24.95	1500	22602
M11	282.77	-6.27	1840	127311
NGC6823	295.79	23.32	1700-6330	168349
NGC 2244	98.05	4.91	1600	53629

CUADRO 3.1: Cúmulos abiertos, con sus respectivas coordenadas en RA y DEC, distancia en pársecs y los miembros finales obtenidos a través de la metodología descrita.

Cúmulo	RA	DEC	Distancia (pc)	Miembros
M92	259.28	43.14	8198.5	1708
M3	205.55	28.38	10420	1854
M5	229.64	2.08	7499	2255
M12	251.81	-1.95	7052	3106
M13	250.42	36.46	7700	4171
M30	325.09	-23.17	8000	25202

CUADRO 3.2: Cúmulos globulares, con sus respectivas coordenadas en RA y DEC, distancia en pársecs y los miembros finales obtenidos a través de la metodología.

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama HR para las Pléyades luego de este procedimiento y la Figura 3.6 corresponde al diagrama HR de M3.

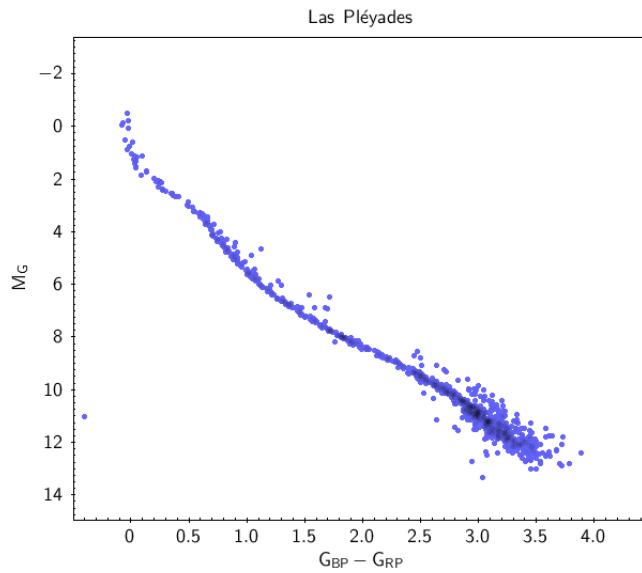


FIGURA 3.5: Diagrama HR para las Pléyades. En el eje x se presenta el índice de color ( $G_{BP} - G_{RP}$ ) y en el eje y la magnitud absoluta en verde encontrada con la fórmula 3.1. Se evidencia que la mayoría de estrellas de este cúmulo se encuentran en la secuencia principal, a excepción de algunas que se observan levemente por encima o debajo de esta. Esto indica que las estrellas de las Pléyades aún están quemando hidrógeno en sus núcleos y no han evolucionado a las etapas de gigantes o enanas.

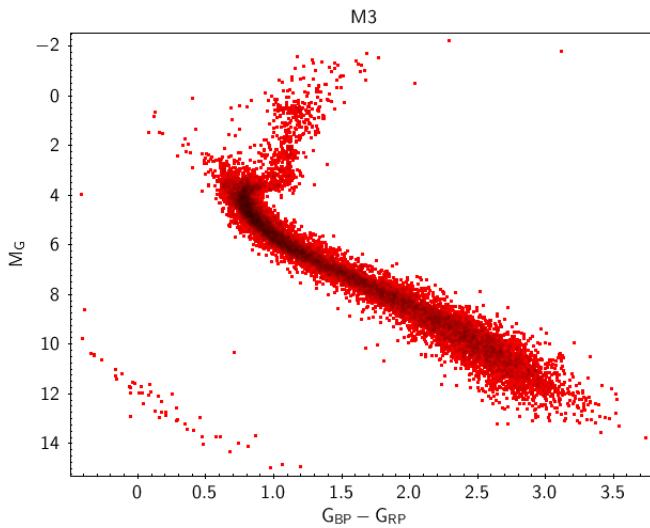


FIGURA 3.6: Diagrama HR para el cúmulo globular M3. A diferencia de los diagramas obtenidos para los cúmulos abiertos, se evidencia un mayor grosor para la secuencia principal. Esto se debe a la presencia de poblaciones estelares con una pequeña dispersión de metalicidad. A la vez, también hay presencia de estrellas en la zona de enanas blancas y en el punto de turn-off.

## Capítulo 4

# Resultados y análisis

Al generar el diagrama de Sandage usando datos de Gaia, fue necesario excluir el cúmulo abierto M11. En la Figura 4.1 se muestra el diagrama para los cúmulos abiertos  $h + \chi$  Persei, NGC 2362, NGC 752, Coma Berenice, las Híades, M41, las Pléyades, M67, El Pesebre y el cúmulo globular M3. Por otro lado, en la Figura 4.2 se presenta el cúmulo abierto M11, cuya alta densidad de estrellas dificultaba la visualización clara en el primer diagrama de la Figura 4.1.

La diferencia en la cantidad de datos entre el diagrama de 1958 y el diagrama actual es significativa, ya que se han agregado muchos más datos en la versión actual. El diagrama actual proporciona una perspectiva más completa y detallada de las diferentes etapas de la vida de las estrellas en estos cúmulos. De esta manera, es posible analizar otras zonas además de la secuencia principal y la zona de gigantes, tal como sucedía en el diagrama de Sandage, ya que, en esta versión actualizada, se presentan estrellas tanto en la zona de enanas blancas como en el red clump. Esto amplía el alcance del análisis y permite una mejor comprensión de la distribución estelar en el diagrama HR.

Se evidencia que la mayoría de estrellas se encuentran en la secuencia principal para casi todos los cúmulos. No obstante, hay presencia de estrellas en la zona de enanas blancas y en la zona de gigantes. A la vez, el punto de turn-off es más evidente en cúmulos abiertos como M67 y M41 al igual que en el cúmulo globular M3, debido a ser uno de los más antiguos y más evolucionados. Es importante mencionar que en el diagrama de Sandage la magnitud absoluta en el visual va desde 8 a -8 y en el diagrama realizado con datos de Gaia DR3 el rango en la magnitud absoluta va de 15 a -5. Esto se debe principalmente a las bandas utilizadas para el procesamiento de los datos, es decir, la diferencia reside en los sistemas fotométricos.

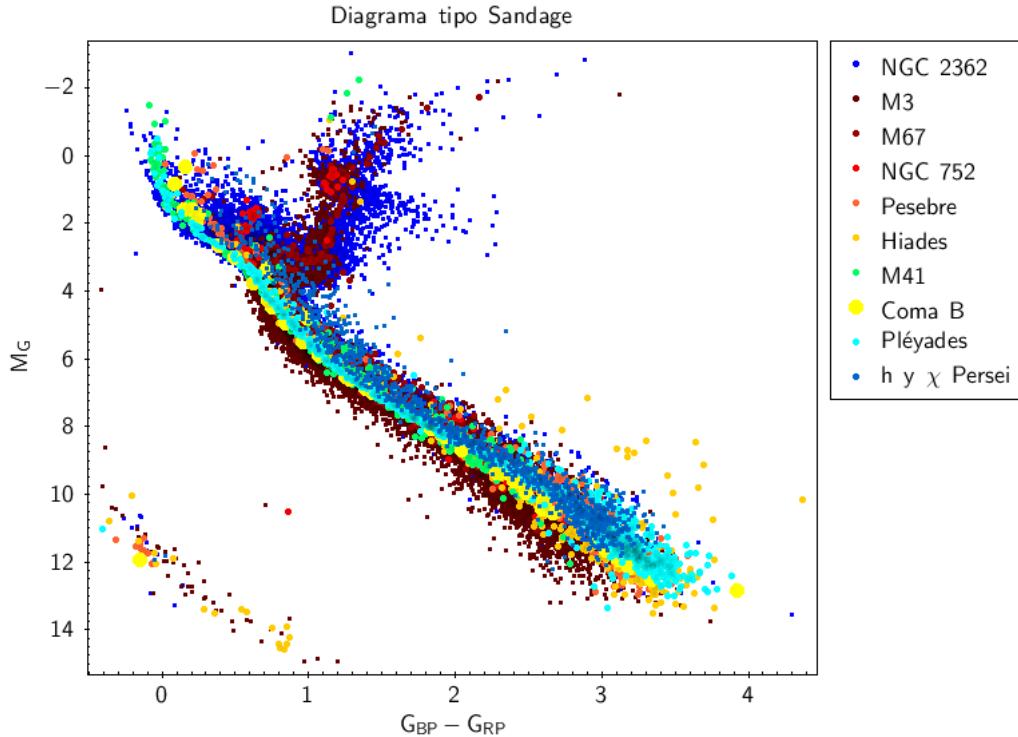


FIGURA 4.1: Diagrama HR tipo Sandage para 9 cúmulos abiertos y 1 cúmulo globular.

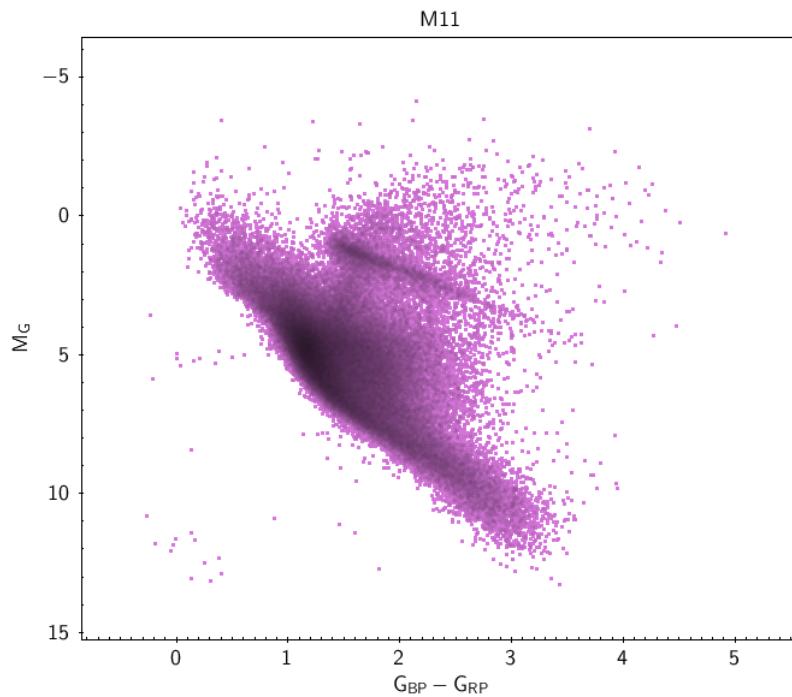


FIGURA 4.2: Diagrama HR para el cúmulo abierto M11. Se presenta alta dispersión de estrellas y sobresale el red clump determinado, indicando que existe fuerte extinción.

En relación a M11, no solo se encuentra poblada la secuencia principal (SP), sino que también hay una dispersión entre esta y la zona de las gigantes. Además, en esta última zona se observa

una línea diagonal que corresponde al red clump. La presencia de esta zona en el cúmulo indica que una cantidad considerable de estrellas están pasando de la secuencia principal, después de haber quemado hidrógeno, hacia la zona de las gigantes. En el diagrama de Sandage, el cúmulo M11 se muestra con su secuencia principal correspondiente y con estrellas en la zona de las gigantes, lo que muestra un gap de Hertzsprung que no se evidencia en el diagrama actualizado. Otra diferencia entre ambos diagramas es la falta de estrellas en la región de las enanas blancas en el diagrama de Sandage, mientras que en el nuevo diagrama sí se muestran. La existencia de estrellas en esta rama indica que, después de pasar por la zona de las gigantes, las estrellas de baja y mediana masa evolucionaron hasta convertirse en enanas blancas.

A continuación, se muestran los diagramas HR para todos los cúmulos globulares (Figura 4.3) y para los cúmulos abiertos trabajados (Figura 4.4) a excepción de los cúmulos NGC 2244 y NGC 6823, mostrados en las Figuras 4.5 y 4.6 respectivamente, debido a que se encuentran inmersos dentro de nebulosas y contienen gran cantidad de estrellas. Asimismo, ambos presentan un red clump muy notorio.

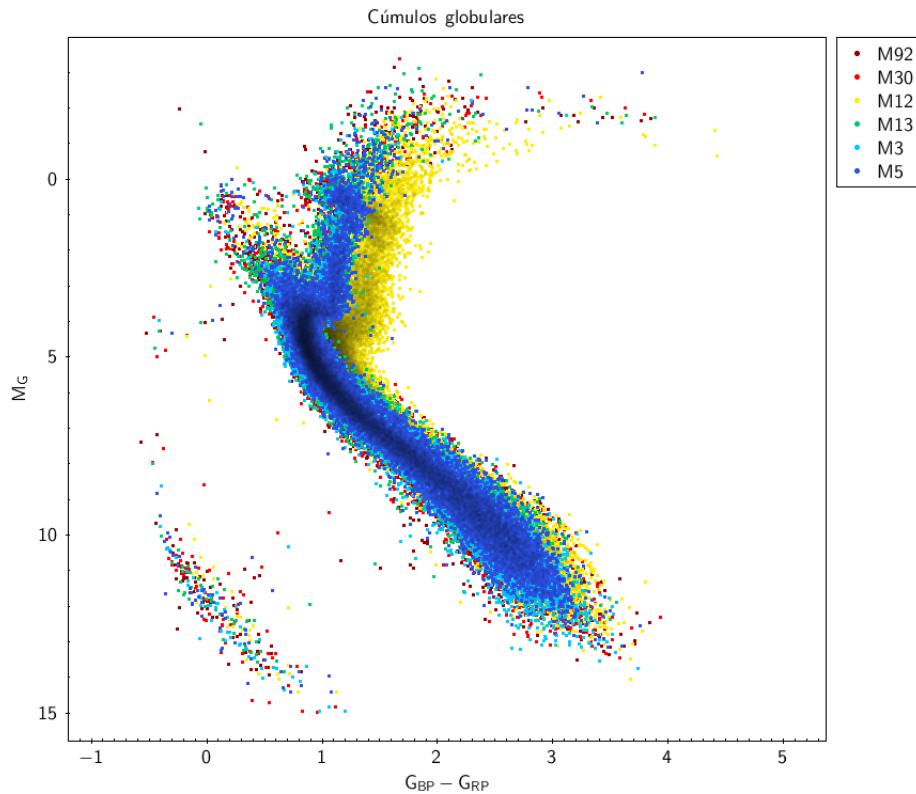


FIGURA 4.3: Diagrama HR para los cúmulos globulares.

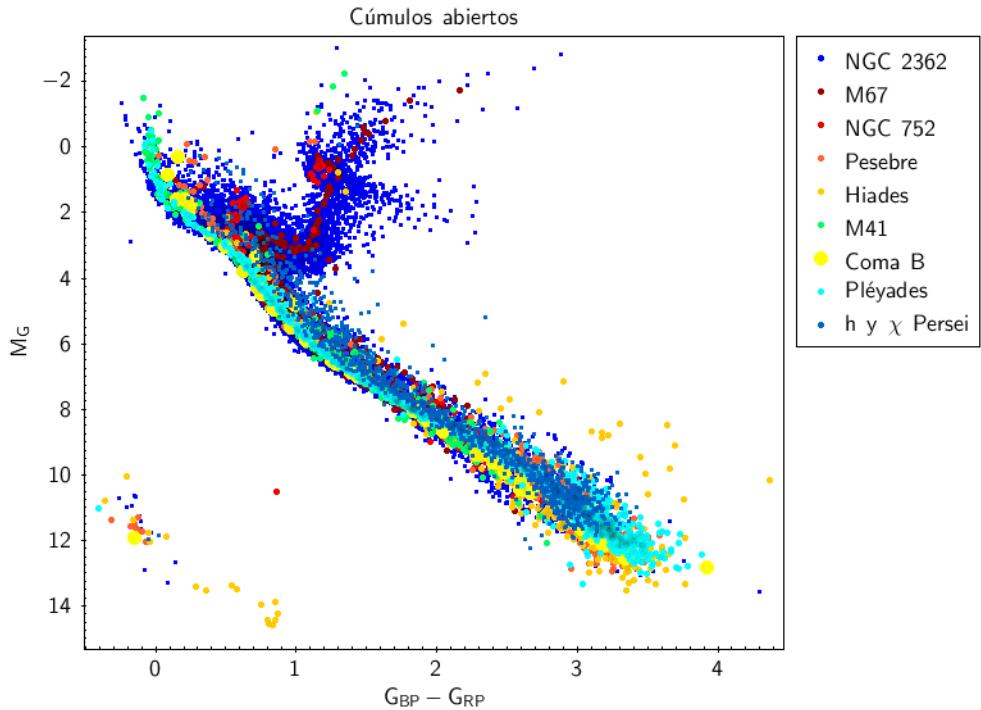


FIGURA 4.4: Diagrama HR para los cúmulos abiertos.

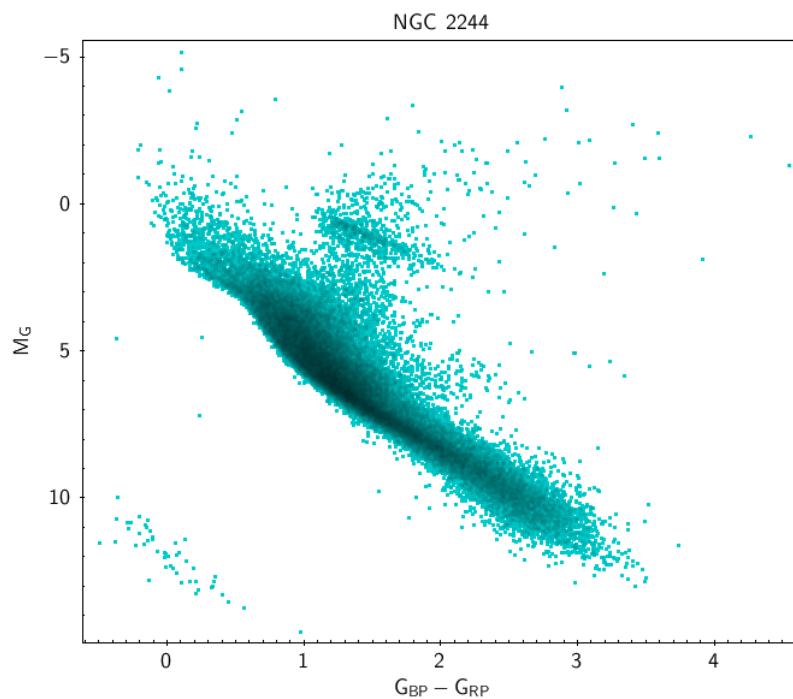


FIGURA 4.5: Diagrama HR para NGC 2244.

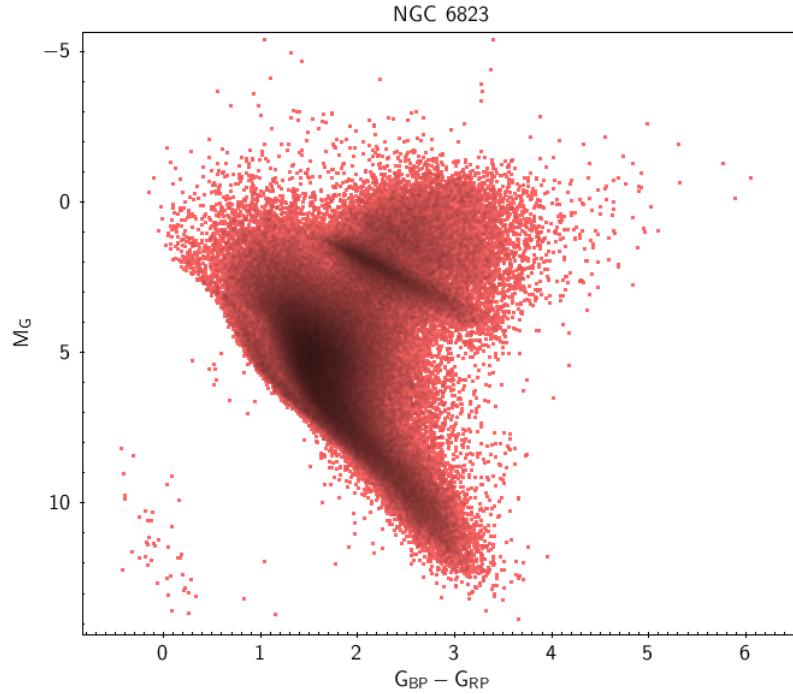


FIGURA 4.6: Diagrama HR para NGC 6823.

Entre los cúmulos del diagrama de Sandage, se encuentran similitudes como es el caso de las Pléyades y Coma Berenice. Como se muestra en la Figura 4.7, ambas secuencias principales lucen superpuestas. Esto indica que pueden compartir factores como composición química y edad de las estrellas. En el caso de 3 de los cúmulos abiertos más antiguos, M41, M67 y NGC 752 (Figura 4.8), las estrellas se dividen entre la SP y la zona de gigantes, presentando un gap de Hertzsprung. Aunque tienen distintos puntos de turn-off, señalando así diferencia de edades, la evolución de estos cúmulos es similar.

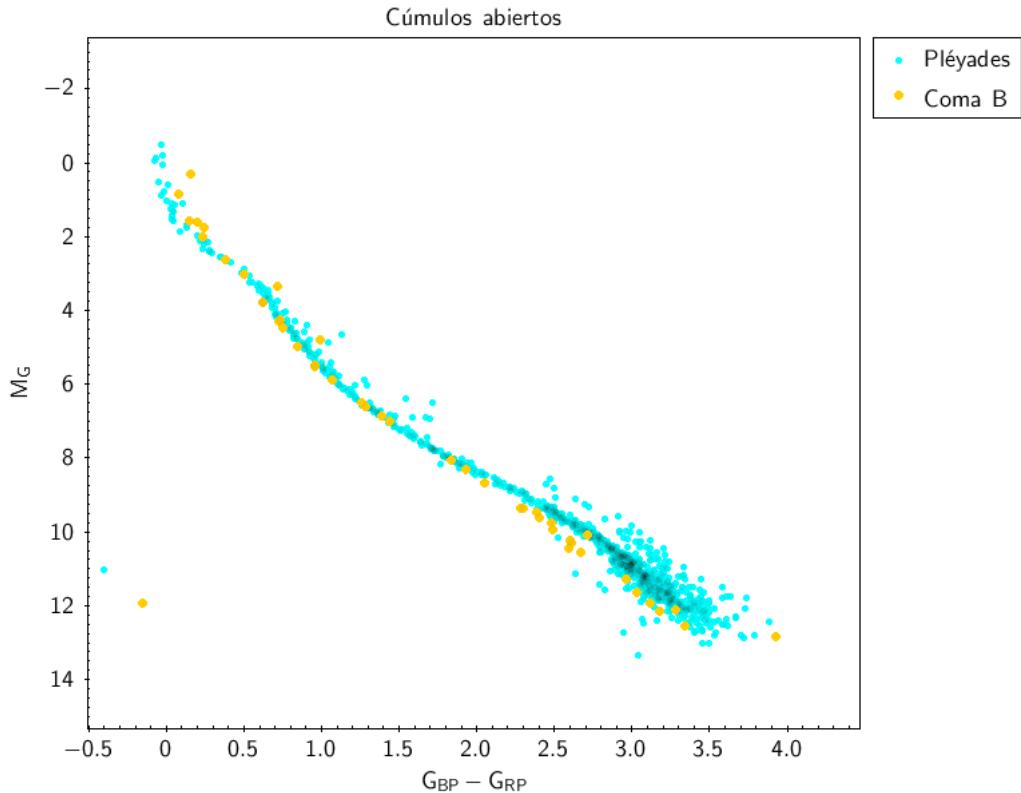


FIGURA 4.7: Diagrama HR para las Pléyades y Coma Berenice.

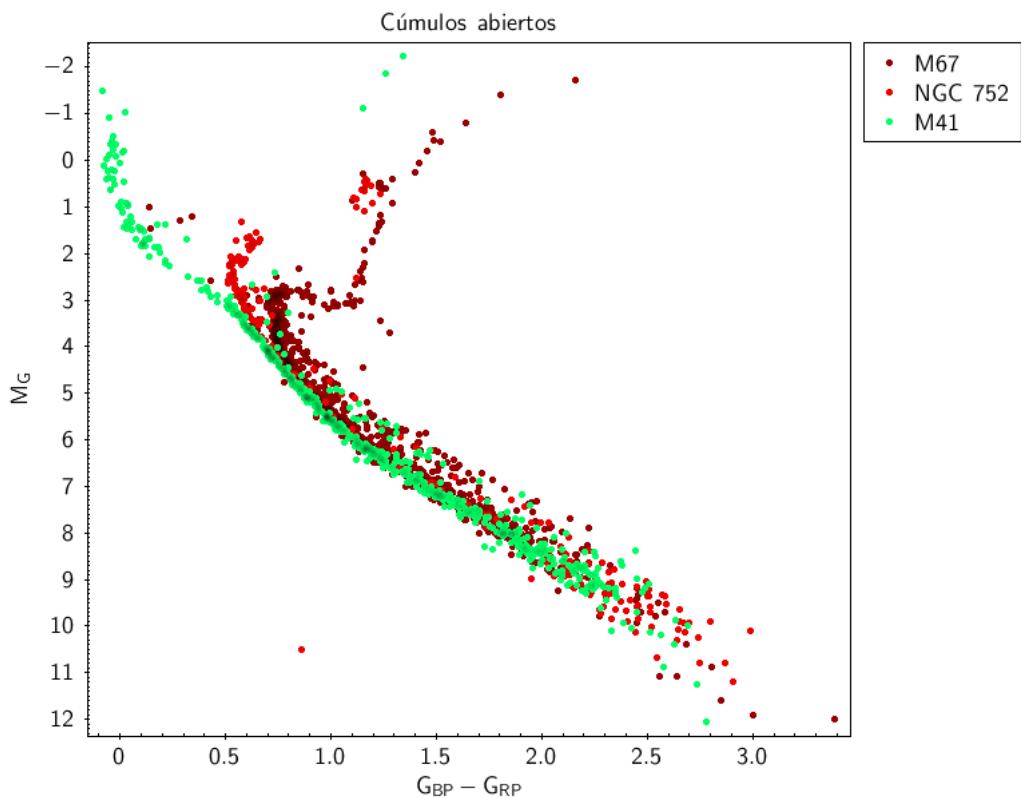


FIGURA 4.8: Diagrama HR para M41, M67 y NGC 752.

#### 4.0.1. Secuencia principal

Por lo general, cada cúmulo presenta el final de la SP en distintos puntos, indicando así diferencia de edad y evolución entre estos. El grosor de la secuencia principal en los cúmulos abiertos, así como en los cúmulos globulares, es relativamente delgado, con un ligero aumento en estos últimos. La secuencia principal es más gruesa entre  $13 > M_G > 10$  y procede a estrecharse a medida que se sube en la gráfica. También, paralela a la línea de la SP se presenta dispersión de estrellas, las cuales pueden corresponder a la secuencia de binarias, a estrellas variables T Tauri o estrellas del campo. Estas presentan el mismo índice de color ( $G_{BP} - G_{RP}$ ) que la SP, pero con diferente  $M_G$  y son más notorias en los cúmulos abiertos.

Acorde a [Van Leeuwen et al. \(2017\)](#) los cúmulos de las Híades y Pesebre parecen compartir características como la edad y la composición química. Al graficarlos en un diagrama HR (Figura 4.9) las SP de ambos se superponen, lo cual respalda este enunciado. Asimismo, la secuencia de binarias es más notoria en esta gráfica, principalmente para las Híades. Por un lado, las estrellas de la SP con compañeras gigantes se encuentran paralelas en el lado derecho de la misma, mientras que aquellas con una compañera en la zona de las enanas blancas se disponen en el lado izquierdo de la SP. Otra opción para las estrellas en esta zona es que sean del campo o que sean T Tauris. Si la diferencia en magnitud respecto a la SP es menor a 0.75 puede que se traten de binarias y en el caso contrario, cuando es mayor, pueden ser T Tauris.

Sobre la SP de los cúmulos globulares y antes de llegar a la zona de gigantes, se presentan estrellas rezagadas azules. Estas estrellas fueron descubiertas por primera vez por Sandage en el año 1953 y se han ido encontrando más a medida de que se analizan estos cúmulos antiguos ([Ferraro et al., 1997](#)). Todos los cúmulos globulares estudiados parecen presentar este tipo de estrellas (Figura 4.10), en especial M3, cúmulo en el cual fueron descubiertas por [Sandage \(1953\)](#).

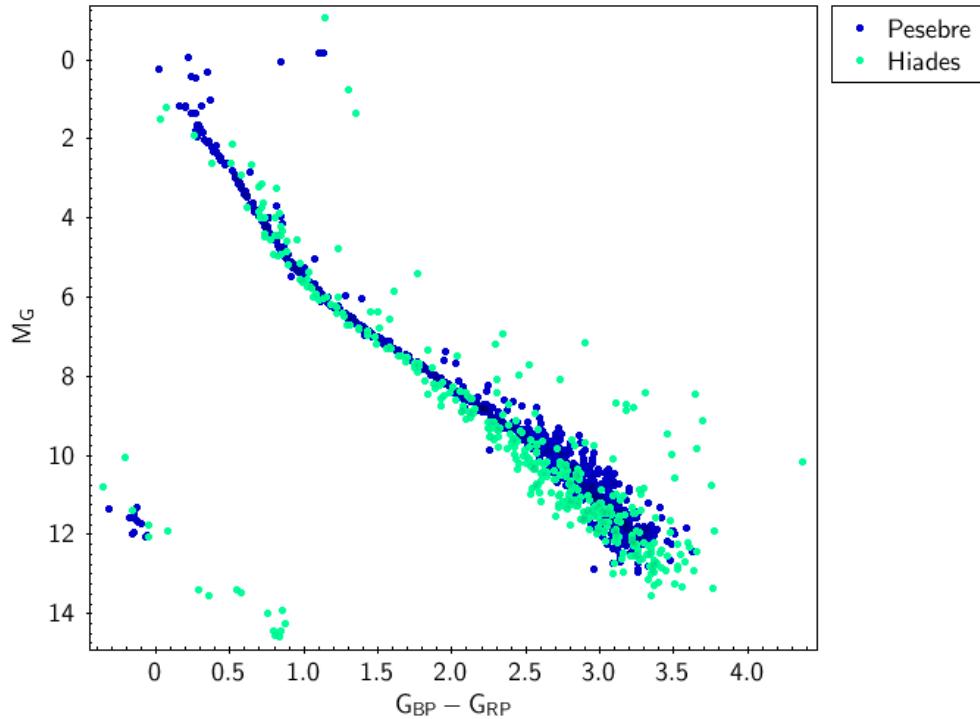


FIGURA 4.9: Diagrama HR para las Híades (verde) y Pesebre (azul). Ambas SP se superponen entre si, señalando similitud en edad y composición química. La línea paralela a la SP indica presencia de binarias, estrellas variables o estrellas del campo. Este comportamiento es más notorio en el cúmulo de las Híades.

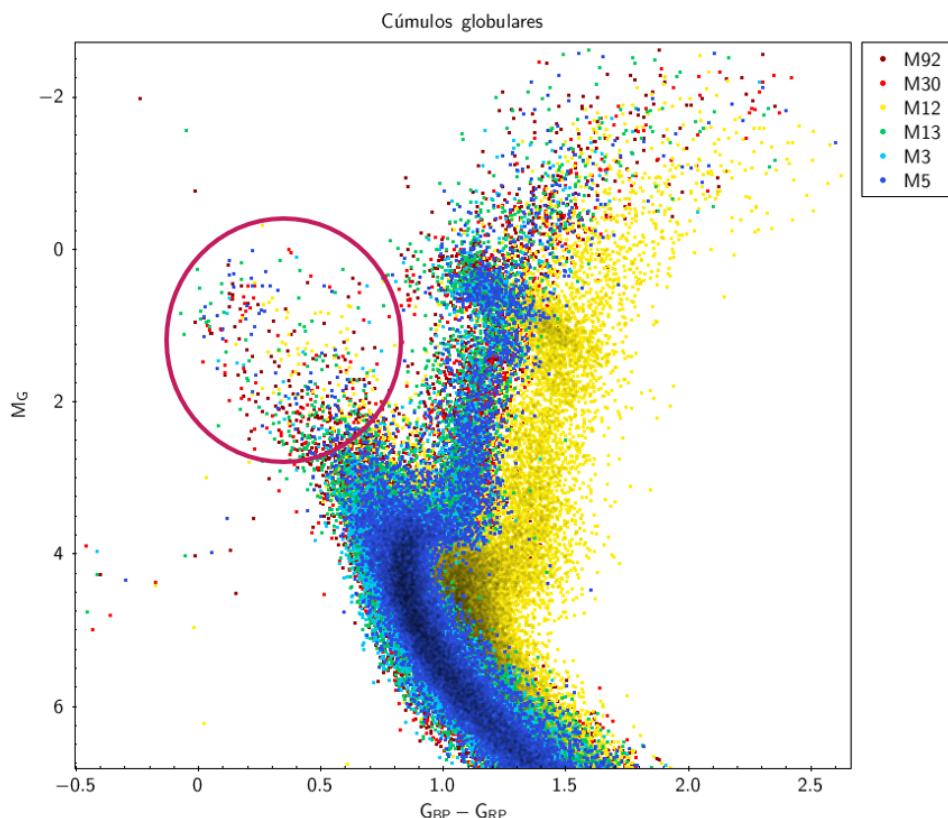


FIGURA 4.10: Diagrama HR para los cúmulos globulares. Se evidencia presencia de estrellas rezagadas azules sobre la SP.

#### 4.0.2. Secuencia de gigantes

En la zona de gigantes, una de las características más prominentes, en el caso de los cúmulos abiertos como NGC 6823, M11 y NGC 2244, es el red clump. Se manifiesta como una línea densa en la región de las gigantes rojas y se refiere a estrellas con un color rojizo debido a su alta metalicidad. Además, estas estrellas del red clump (RC) también están en la etapa de quemar helio en sus núcleos. NGC 2362 también es un cúmulo abierto que presenta esta característica, aunque no es tan evidente como en los casos anteriores. Por otro lado, los demás cúmulos abiertos no exhiben este rasgo. Sin embargo, todos los cúmulos globulares muestran esta agrupación de estrellas, con la excepción de M3, en el cual no es tan notorio. Las estrellas con menor metalicidad tienden a formar la rama horizontal de gigantes.

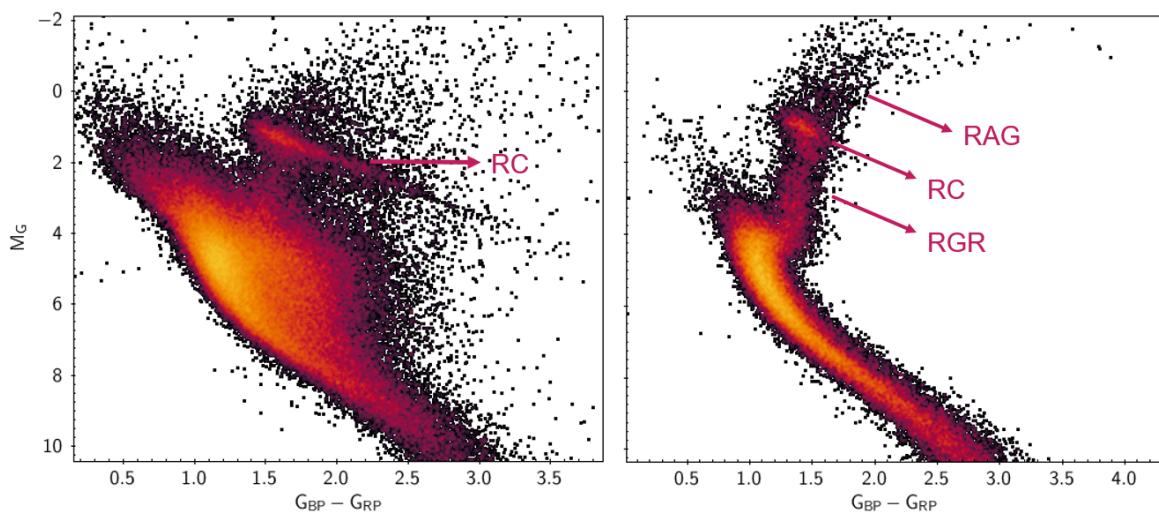


FIGURA 4.11: Rama de gigantes y las zonas evidenciadas en los diagramas HR de M11 (izquierda) y M12 (derecha).

En la Figura 4.11, se muestra la región de las gigantes en el cúmulo abierto M11 y el cúmulo globular M12. En ambos casos, se observa una agrupación característica alrededor de  $G_{BP} - G_{RP} = 1,5$ , y se puede apreciar desde magnitudes absolutas  $M_G$  de aproximadamente 1 y 0.5, respectivamente. En la figura, para M12, se presenta la rama de gigantes rojas (RGR) y la rama asintótica de gigantes (RAG). A la vez, para los cúmulos globulares se presenta la rama horizontal, en casos como M5 hay presencia de estrellas en la zona de rama horizontal azul y en M13 se presenta tanto la rama horizontal azul como roja (Ver Figura 4.3). Según Mucciarelli et al. (2016), la presencia de estrellas en la rama horizontal en la región azul o roja está directamente relacionada con niveles de sodio bajos o altos, respectivamente. En cambio, estas zonas no se evidencian en los cúmulos abiertos. En la Figura 4.3 se evidencian estrellas de la zona horizontal migrando hacia la parte baja del diagrama en magnitud absoluta  $M_G$  entre 2 y 4 e índice de color cercano a 0.5. En el estudio realizado por Babusiaux et al. (2018), hay una concentración de estrellas en esta región

gracias a que se presenta una colección mayor de cúmulos y también se estudian estrellas del campo, y son relacionadas con subenanas calientes producto de gigantes rojas que perdieron sus capas externas de hidrógeno. Las estrellas subenanas calientes no solo se encuentran en el campo de la galaxia, sino también en cúmulos globulares ([Heber, 2009](#)). En el diagrama realizado en este proyecto, la cantidad de estrellas es menor debido a que solo se tienen 6 cúmulos globulares, sin embargo se evidencia este comportamiento. Cabe mencionar que la rama de supergigantes se evidencia como un grupo poblado en la zona derecha del diagrama HR para los cúmulos globulares, sobre la región de gigantes rojas. Las estrellas ubicadas en esta región corresponden a etapas evolutivas avanzadas de estrellas masivas y luminosas.

## 4.1. Nebulosas planetarias

Las estrellas gigantes rojas son las precursoras de las nebulosas planetarias, al perder masa se da lugar a la formación de una envoltura circunestelar amplia (Kwok et al., 1978), es decir, material alrededor de la estrella. El recorrido evolutivo que una estrella sigue desde el término de la fase de RAG hasta el comienzo de la etapa de enfriamiento en la secuencia de enanas blancas corresponde a la creación de nebulosas planetarias (Salaris & Cassisi, 2005). Debido a que en el diagrama HR la concentración de estrellas está directamente relacionada con cuánto tiempo pasan estas en una zona, al ser la etapa de nebulosas planetarias muy corta, se dificulta su observación. Gracias a que Gaia es capaz de examinar objetos estelares en un amplio rango de magnitudes, es posible extender y profundizar en el estudio de estas estrellas que antes se dificultaba por la debilidad de las estrellas centrales (Kerber et al., 2003).

En el estudio llevado a cabo por Babusiaux et al. (2018) a partir de información de Gaia DR2, se analizaron este tipo de estrellas a través de un cruce de datos con catálogos de nebulosas planetarias. Así, graficaron las nebulosas planetarias en un diagrama HR, observando a la mayoría en una línea vertical desde la RAG hasta la rama de enanas blancas. Este comportamiento también fue encontrado en la realización del diagrama HR para todos los cúmulos globulares de este proyecto, como se muestra en la Figura 4.12. Entre la RAG y la rama de enanas blancas, se evidencia la migración de estas estrellas. Durante este proceso, el gas se expande y la estrella central aumenta su temperatura a luminosidad constante para luego contraerse y fusionar el hidrógeno. A medida que esto se acaba, la estrella disminuye su temperatura y se convierte en una enana blanca (Babusiaux et al., 2018). Debido a que son estrellas que siguen esta ruta, pueden considerarse como nebulosas planetarias. No obstante, es necesaria la comparación con catálogos de este tipo de objetos estelares para realizar una identificación correcta de los mismos. Cabe mencionar que esta tendencia no se aprecia en el diagrama HR de los cúmulos abiertos. Esto puede deberse principalmente a que estos cúmulos son agrupaciones de estrellas jóvenes, es decir, la mayoría se encuentra en la secuencia principal y son pocas las que han llegado a la zona de enanas blancas. Igualmente, la fase de nebulosas planetarias es muy corta. A la vez, el diagrama de los cúmulos globulares (Figura 4.3), a pesar de contener solo 6 cúmulos, cuenta con un total de 182.196 estrellas mientras que el diagrama HR de los cúmulos abiertos (Figura 4.4), presenta 28.202 estrellas.

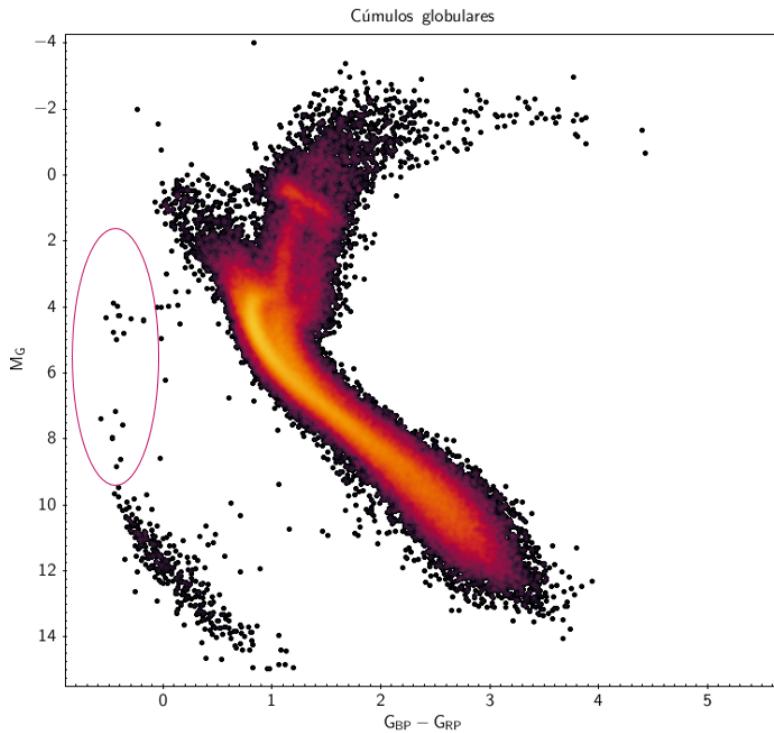


FIGURA 4.12: Diagrama HR para todos los cúmulos globulares estudiados. El código de colores responde a la densidad de estrellas (en amarillo las zonas más pobladas). Señalizadas dentro del óvalo, las posibles nebulosas planetarias.

## 4.2. Secuencia de enanas blancas

La región de enanas blancas se presenta en los diagramas HR como una agrupación de estrellas en la zona inferior izquierda de la gráfica. A pesar de contar con una cantidad menor de cúmulos, la presencia de estrellas en esta rama es más evidente para el diagrama HR de los cúmulos globulares, donde aparece aproximadamente desde -0.5 a 1 para el índice de color  $G_{BP} - G_{RP}$  y en un rango de 15 a 9 para la magnitud absoluta  $M_G$ . En el caso de los cúmulos abiertos, se muestra desde una  $M_G$  alrededor de 15 hasta 10 y para un  $G_{BP} - G_{RP}$  desde -0.5 hasta 1, pero es muy poca la existencia de estrellas ahí. No todos los cúmulos abiertos contribuyen a la presencia de estrellas en esta zona, este es el caso de M41 y M67. Sin embargo, sí hay presencia para estos cúmulos en la zona de gigantes, luego de un gap de Hertzsprung, por lo que se puede asumir que la evolución estelar en estos cúmulos está dominada por estrellas masivas. Para el resto de cúmulos abiertos, se presentan 1 o más estrellas en la zona de enanas blancas, correspondientes a estrellas binarias.

La razón entre la cantidad de estrellas en cada diagrama, se relaciona directamente con la edad de los cúmulos. La rama de enanas blancas es una de las etapas evolutivas finales de las estrellas, luego de agotar su combustible y recorrer etapas como la SP y la zona de gigantes.

Los cúmulos globulares al ser más antiguos, han tenido más tiempo para llevar a cabo estos procesos. Es importante destacar que en el diagrama de Sandage no hay presencia de estrellas en esta rama y se debe a la reducida cantidad de datos con el cual fue realizado y también influye el hecho de que solo hay 1 cúmulo globular.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo futuro

### 5.1. Conclusiones

En este proyecto de grado se llevó a cabo un análisis de cúmulos estelares en la Vía Láctea con el objetivo de obtener diagramas HR. Para lograrlo, se utilizó un método de pertenencia rápido que permitió identificar una muestra aproximada de estrellas en 18 cúmulos globulares y abiertos de nuestra galaxia. Una vez obtenida esta muestra, se procedió a generar múltiples diagramas HR utilizando la fotometría proporcionada por Gaia. Además, se decidió actualizar el diagrama HR utilizado por Sandage en su trabajo de 1958. Esta actualización resulta necesaria debido a los avances científicos y tecnológicos, así como a la disponibilidad de información más completa obtenida por las misiones espaciales como Gaia.

Gracias a la gran cantidad de información recopilada por Gaia, en comparación con la limitada disponibilidad en investigaciones previas, fue posible observar la presencia de estrellas en regiones que anteriormente no se registraban en el diagrama de Sandage. Esto revela la importancia de la misión Gaia en la ampliación de nuestro conocimiento sobre la distribución y características estelares en nuestra galaxia. A pesar de las diferencias en los sistemas fotométricos utilizados en el diagrama de Sandage (sistema UBVRI de Johnson-Cousins) y el sistema de Gaia, fue posible realizar comparaciones y establecer correlaciones al analizar las ramas del diagrama HR, ya que cada secuencia en el diagrama representa una etapa en la vida de las estrellas, conllevando procesos distintos y cambios en factores como la temperatura, el tipo espectral, la composición química y la masa, entre otros. Se encontraron diferencias significativas en este estudio. En primer lugar, se observó una disminución en la cantidad de gaps de Hertzsprung, y aquellos que se identificaron eran más cortos con respecto al diagrama de Sandage. Además, se destacó la presencia notable de una secuencia de enanas blancas, que se observó en ambos tipos de cúmulos y no se presentaba en el diagrama de Sandage.

Fue posible analizar las diferencias entre los diagramas de los cúmulos globulares y los abiertos y ver cómo factores como la edad y la metalicidad influyen en la distribución de estrellas. En los cúmulos globulares, los cuales presentan estrellas más antiguas, se observó una distribución más densa y compacta en el diagrama HR. Esto se debe a que las estrellas en los cúmulos globulares tienen una edad similar y una composición química relativamente homogénea. Estas condiciones hacen que las estrellas sigan trayectorias bien definidas en el diagrama HR, con una secuencia principal relativamente estrecha y una rama de gigantes rojas muy sobresaliente con partes distintivas como la rama asintótica de gigantes, la rama de gigantes rojas y el red clump. En los cúmulos abiertos, agrupaciones más jóvenes, la mayoría de estrellas se encontraba en la secuencia principal y los puntos de turn-off se encontraban en distintos lugares para cada cúmulo, indicando la diferencia de edad entre los mismos.

Gracias a este trabajo, se logró evidenciar el red clump, la presencia de estrellas rezagadas azules y nebulosas planetarias. Todo esto contribuye a enriquecer nuestro conocimiento sobre la evolución estelar en nuestra galaxia.

## 5.2. Trabajo futuro

Con el fin de llevar a cabo un estudio evolutivo más profundo de estos cúmulos estelares, es necesario abordar ciertos aspectos. Uno de ellos es determinar con precisión la edad de cada cúmulo, lo cual puede lograrse mediante el uso de modelos como las isócronas. Estos modelos proporcionan información crucial para obtener una estimación precisa de la edad de cada cúmulo estelar. Además, es fundamental profundizar en la relación entre las etapas estelares y la metalicidad de los cúmulos. Comprender la composición química de cada cúmulo y establecer su relación con su posición en el diagrama HR y su luminosidad resulta de gran utilidad para obtener una visión más completa de la evolución estelar en la Vía Láctea.

Otra forma de complementar este trabajo es mediante la correlación con diferentes catálogos, que permitan identificar diversos tipos de estrellas. Por ejemplo, sería beneficioso explorar la presencia de nebulosas planetarias y enanas marrones dentro de los cúmulos estelares. Estos elementos adicionales enriquecerían el análisis y brindarían una perspectiva más completa sobre los procesos estelares y su evolución en la Vía Láctea. Además, es fundamental ampliar la cantidad de cúmulos estudiados y mejorar el método utilizado para determinar la pertenencia de las estrellas a cada uno de ellos, con el objetivo de obtener la muestra más precisa y completa de los miembros de cada grupo. Este enfoque permitiría obtener un panorama más sólido de la evolución estelar en la Vía Láctea. Por último, resultaría beneficioso determinar los valores de extinción para cada cúmulo, y así obtener un valor de magnitud absoluta más preciso. La inclusión de estos valores en los cálculos permitiría obtener resultados más confiables.

# Referencias

- Alfonso J. E., et al., 2019, *Pertenencia de estrellas a cúmulos abiertos usando movimientos propios de Gaia*
- Babusiaux C., et al., 2018, *Gaia Data Release 2-Observational Hertzsprung-Russell diagrams*, Astronomy & Astrophysics, 616, A10
- Bessell M. S., 2005, *Standard photometric systems*, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 43, 293
- Carroll B. W., Ostlie D. A., 2017, *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press
- Collaboration G., et al., 2018, *Summary of the contents and survey properties*, Astronomy and Astrophysics, 616, A1
- ESA 2022a, *GAIA DATA RELEASE 3*, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>
- ESA 2022b, Technical report, *The Gaia mission*. European Space Agency
- ESA 2023, *HIPPARCOS HERTZSPRUNG-RUSSELL DIAGRAMS*, <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos/h-r-diagrams>
- ESA/Hubble 2021b, Technical report, *Image Archive: Star Clusters*, <https://esahubble.org/images/archive/category/starclusters/>. ESA/Hubble, <https://esahubble.org/images/archive/category/starclusters/>
- ESA/Hubble 2021a, Technical report, *Open Cluster*, <https://esahubble.org/wordbank/open-cluster/>. ESA/Hubble, <https://esahubble.org/wordbank/open-cluster/>
- Evans D., Riello M., De Angeli F., Carrasco J., Montegriffo P., et al., 2018, *Gaia data release 2-photometric content and validation*, Astronomy & Astrophysics, 616, A4
- Ferraro F., Paltrinieri B., Pecci F. F., Cacciari C., Dorman B., et al., 1997, *HST observations of blue straggler stars in the core of the globular cluster M3*, arXiv preprint astro-ph/9703026

- Friel E., 1995, *The old open clusters of the Milky Way*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 33, 381
- Hansen C. J., Kawaler S. D., Trimble V., 2012, *Stellar interiors: physical principles, structure, and evolution*. Springer Science & Business Media
- Heber U., 2009, *Hot subdwarf stars*, Annual review of Astronomy and Astrophysics, 47, 211
- Johnson H., 1963, *Photometric Systems*. the University of Chicago Press
- Jordi C., Gebran M., Carrasco J., De Bruijne J., Voss H., et al., 2010, *Gaia broad band photometry*, Astronomy & Astrophysics, 523, A48
- Karttunen H., Kröger P., Oja H., Poutanen M., Donner K. J., 2007, *Fundamental astronomy*. Springer
- Kerber F., Mignani R., Guglielmetti F., Wicenec A., 2003, *Galactic Planetary Nebulae and their central stars-I. An accurate and homogeneous set of coordinates*, Astronomy & Astrophysics, 408, 1029
- Krumholz M. R., McKee C. F., Bland-Hawthorn J., 2019, *Star clusters across cosmic time*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 57, 227
- Kwok S., Purton C. R., Fitzgerald P. M., 1978, *On the origin of planetary nebulae*, The Astrophysical Journal, 219, L125
- Lada C. J., Lada E. A., 2003, *Embedded clusters in molecular clouds*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 41, 57
- Langer N., Kudritzki R., 2014, *The spectroscopic Hertzsprung-Russell diagram*, Astronomy & Astrophysics, 564, A52
- Minniti D., Navarro M. G., 2019, *The VVV Survey: Globular Clusters and more*, Proceedings of the International Astronomical Union, 14, 31–34
- Mucciarelli A., Dalessandro E., Massari D., Bellazzini M., Ferraro F. R., et al., 2016, *NGC 6362: the least massive globular cluster with chemically distinct multiple populations*, The Astrophysical Journal, 824, 73
- Murdin P., 2001, *Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics*. CRC Press
- Pols O. R., 2011, *Stellar structure and evolution*. Astronomical Institute Utrecht NY
- Prialnik D., 2000, *An introduction to the theory of stellar structure and evolution*. Cambridge University Press

- Prusti T., De Bruijne J., Brown A. G., Vallenari A., Babusiaux C., et al., 2016, *The gaia mission*, Astronomy & astrophysics, 595, A1
- Rich R. M., Sosin C., Djorgovski S. G., Piotto G., King I. R., et al., 1997, *Discovery of extended blue horizontal branches in two metal-rich globular clusters*, The Astrophysical Journal, 484, L25
- Riello M., De Angeli F., Evans D., Montegriffo P., Carrasco J., et al., 2021, *Gaia early data release 3-photometric content and validation*, Astronomy & Astrophysics, 649, A3
- Rowell N., Davidson M., Lindegren L., Van Leeuwen F., Castañeda J., et al., 2021, *Gaia Early Data Release 3-Modelling and calibration of Gaia's point and line spread functions*, Astronomy & Astrophysics, 649, A11
- Russell H. N., 1979, *35. Relations between the Spectra and Other Characteristics of Stars*. Harvard University Press, Cambridge, MA and London, England, pp 212–220, [doi:doi:10.4159/harvard.9780674366688.c39](https://doi.org/10.4159/harvard.9780674366688.c39), <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674366688.c39>
- Salaris M., Cassisi S., 2005, *Evolution of stars and stellar populations*. John Wiley & Sons
- Sandage A. R., 1953, *The color-magnitude diagram for the globular cluster M3.*, The Astronomical Journal, 58, 61
- Sandage A., 1958, *The color-magnitude diagrams of galactic and globular clusters and their interpretation as age groups*, Ricerche Astronomiche, 5, 41
- Spitzer L., Shull J. M., 1975, *Random gravitational encounters and the evolution of spherical systems. VII-Systems with several mass groups*, The Astrophysical Journal, 201, 773
- Stanek K., Mateo M., Udalski A., Szymanski M., Kaluzny J., et al., 1994, *Color-Magnitude Diagram Distribution of the Bulge Red Clump Stars-Evidence for the Galactic Bar*, arXiv preprint astro-ph/9404026
- Strand K. A., 1977, in The HR Diagram, In Memory of Henry Norris Russell. IAU Symposium No. 80, held November 2, 1977, at the National Academy of Sciences, Washington, DC. Report No. 13, edited by AG Davis Philip and David H. DeVorkin, December, 1977., p. 55. p. 55
- Van Leeuwen F., Vallenari A., Jordi C., Lindegren L., Bastian U., et al., 2017, *Gaia Data Release 1-Open cluster astrometry: performance, limitations, and future prospects*, Astronomy & Astrophysics, 601, A19
- Vasiliev E., 2019, *Proper motions and dynamics of the Milky Way globular cluster system from Gaia DR2*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 484, 2832

Wang P., Chen W., Lin C., Pandey A., Huang C., et al., 2014, *Characterization of the Praesepe star cluster by photometry and proper motions with 2MASS, PPMXL, and Pan-STARRS*, The Astrophysical Journal, 784, 57

Wenger M., Ochsenbein F., Egret D., Dubois P., Bonnarel F., et al., 2000, *The SIMBAD astronomical database-The CDS reference database for astronomical objects*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 143, 9

# Apéndices

## Apéndice A: Query ADQL

```
SELECT source_id, ra, ra_error, dec, dec_error, parallax, parallax_error, pmra,
pmra_error, pmdec, pmdec_error, phot_g_mean_mag AS g,
phot_rp_mean_mag AS rp, phot_bp_mean_mag AS bp, radial_velocity AS rv,
radial_velocity_error AS rv_error FROM gaiadr3.gaia_source AS gaia
WHERE CONTAINS(POINT('ICRS',gaia.ra,gaia.dec),CIRCLE('ICRS',RA, DEC,3))=1
AND gaia.pmra IS NOT NULL AND gaia.pmra != 0
AND gaia.pmdec IS NOT NULL AND gaia.pmdec != 0
AND gaia.rupe < 1.4 AND gaia.phot_g_mean_flux_over_error > 10
AND gaia.phot_rp_mean_flux_over_error > 10
AND gaia.phot_bp_mean_flux_over_error > 10
AND gaia.visibility_periods_used > 8
AND gaia.astrometric_excess_noise < 1
AND gaia.parallax_over_error > 10
AND gaia.parallax IS NOT NULL AND gaia.parallax != 0
AND gaia.parallax > 2
AND phot_bp_rp_excess_factor < 1.3+0.06*power(phot_bp_mean_mag-phot_rp_mean_mag,2)
AND phot_bp_rp_excess_factor > 1.0+0.015*power(phot_bp_mean_mag-phot_rp_mean_mag,2)
AND astrometric_chi2_al/(astrometric_n_good_obs_al-5)
<1.44*greatest(1,exp(-0.4*(phot_g_mean_mag-19.5)))
```

## Apéndice B: Histogramas, diagramas de movimientos propios y diagrama HR para cada cúmulo.

### NGC 2362

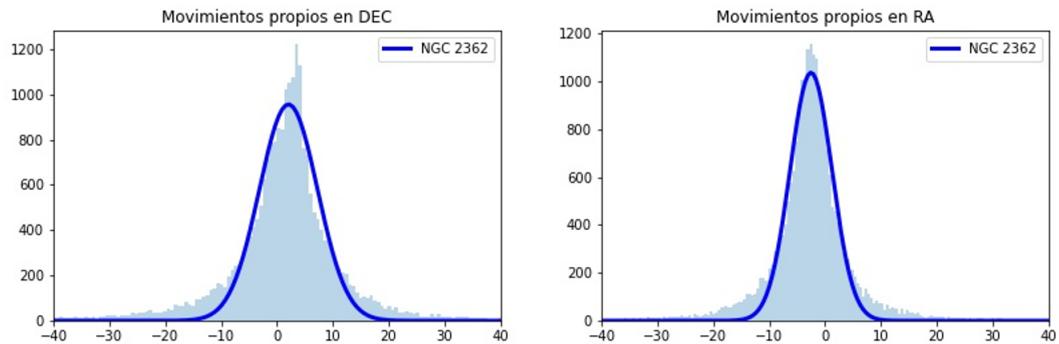


FIGURA 1: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para NGC 2362.

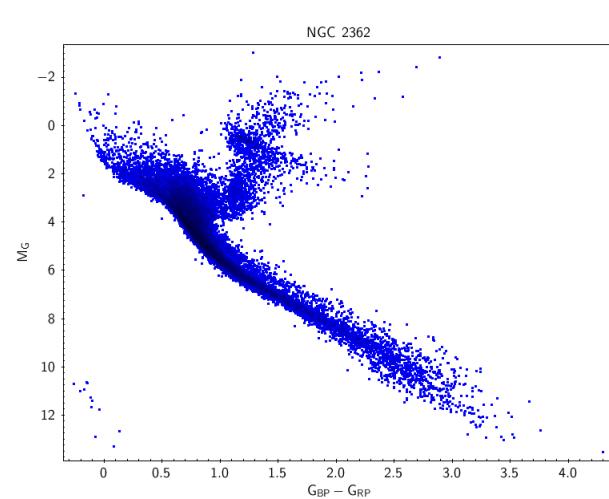
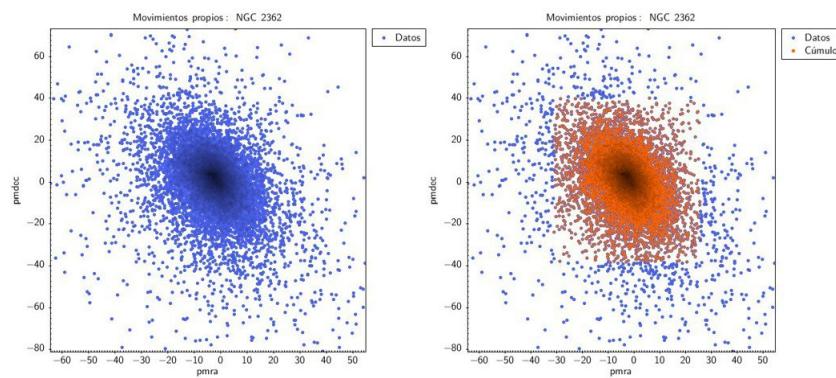
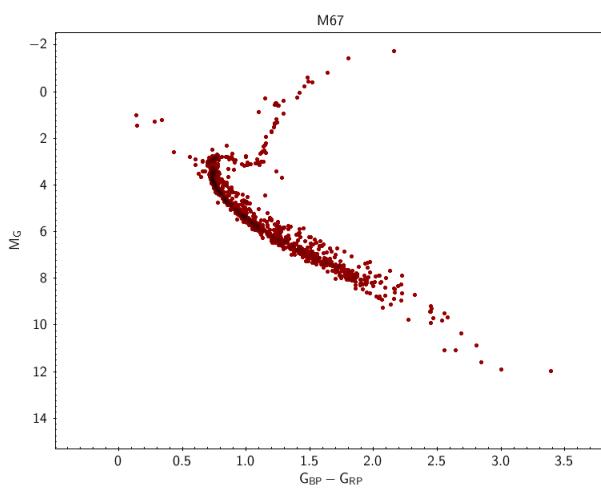
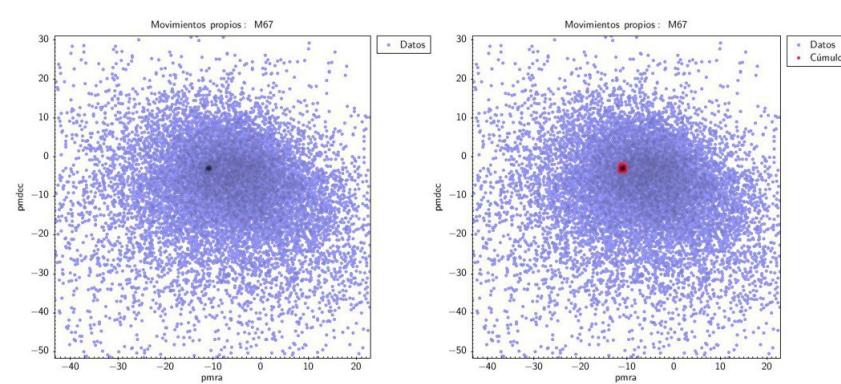
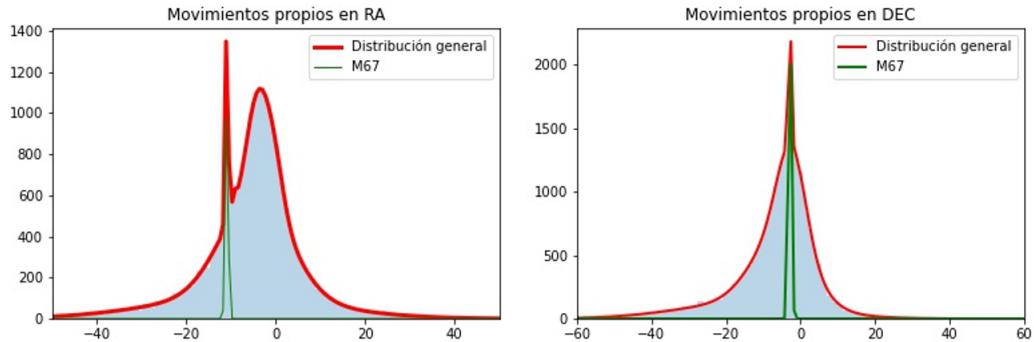


FIGURA 3: Diagrama HR para NGC 2362.

## M67



## NGC 752

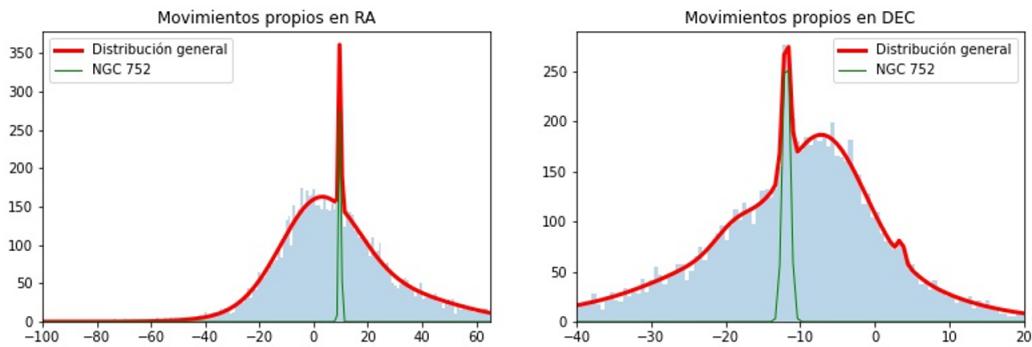


FIGURA 7: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para NGC 752.

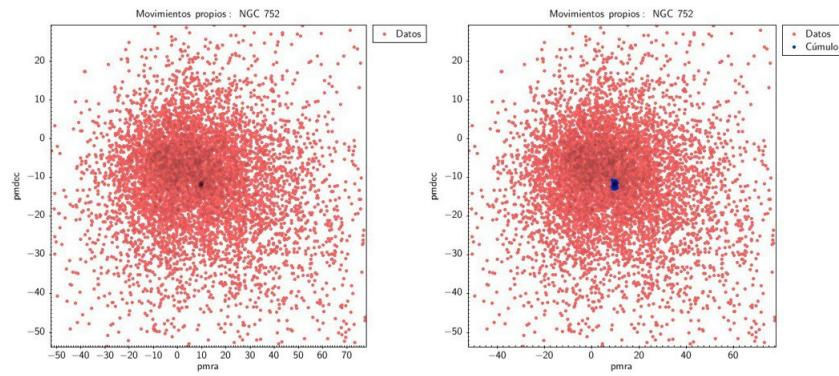


FIGURA 8: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para NGC 752. En salmon los datos iniciales y en azul los miembros del cúmulo.

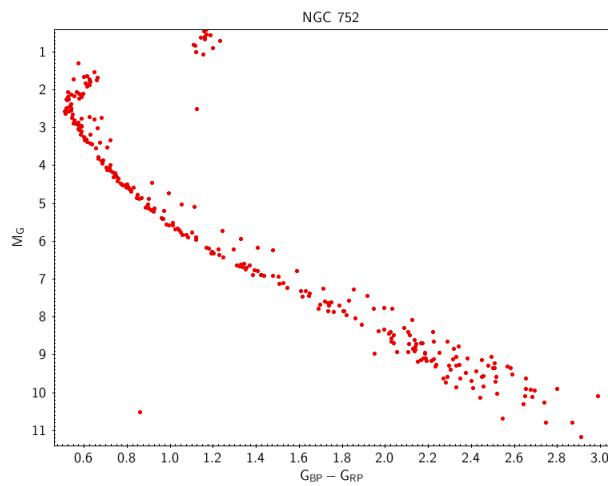


FIGURA 9: Diagrama HR para NGC 752.

## Pesebre

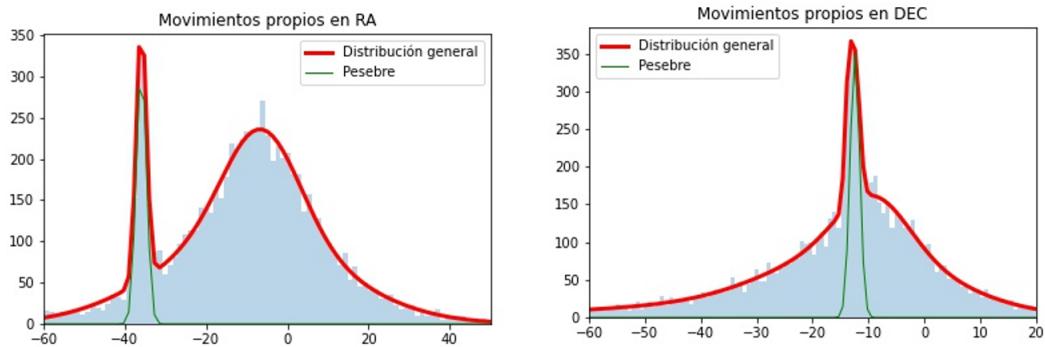


FIGURA 10: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para pesebre.

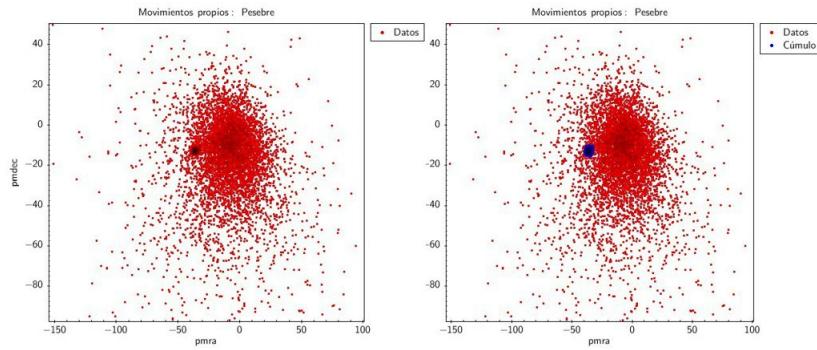


FIGURA 11: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para pesebre. En rojo los datos iniciales y en azul los miembros del cúmulo.

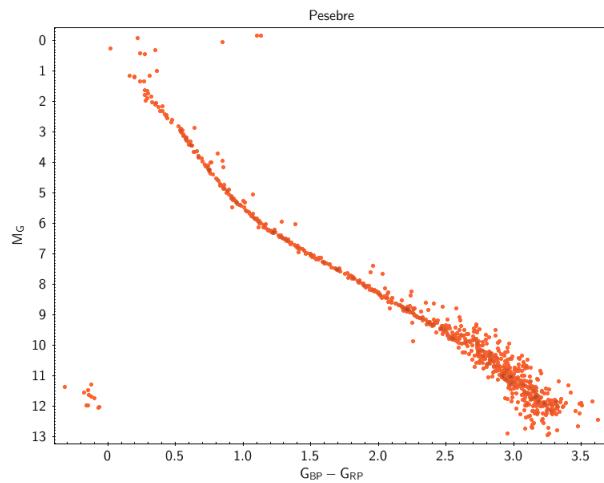


FIGURA 12: Diagrama HR para pesebre.

## Las Híades

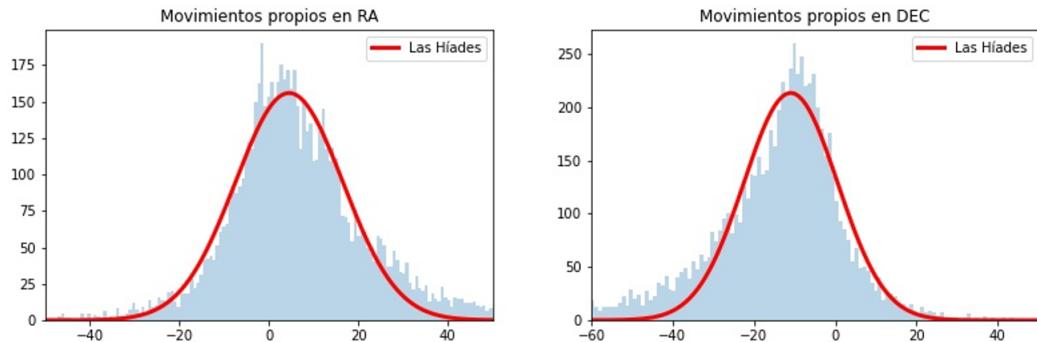


FIGURA 13: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para Las Híades.

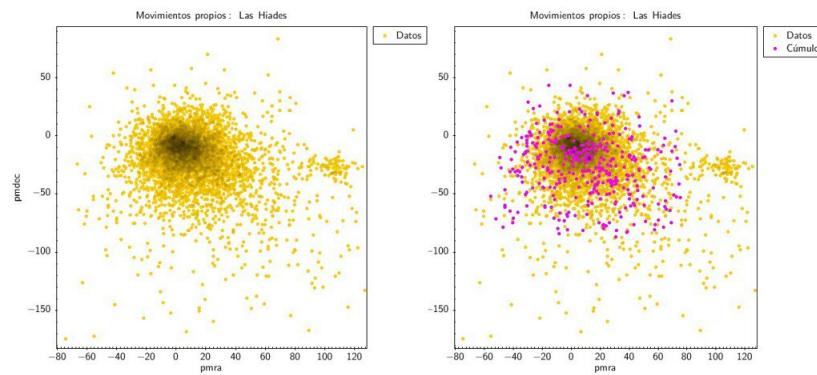


FIGURA 14: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para Las Híades. En amarillo los datos iniciales y en fucsia los miembros del cúmulo.

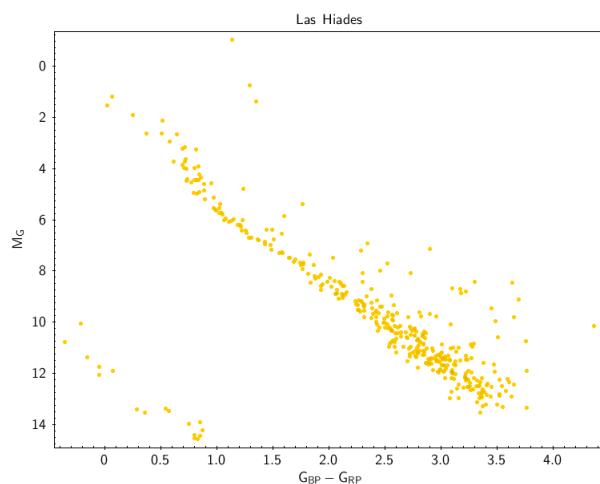
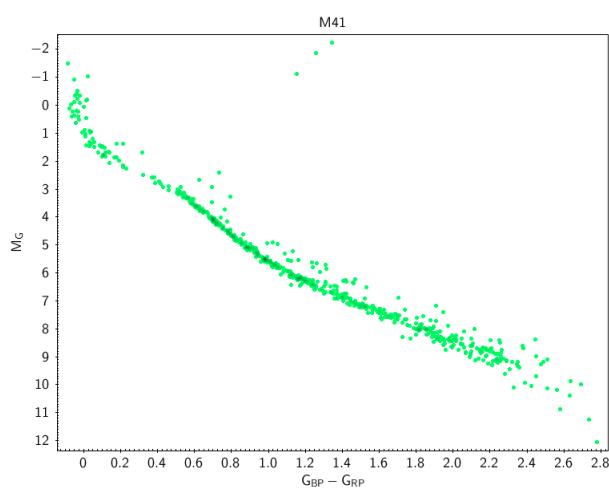
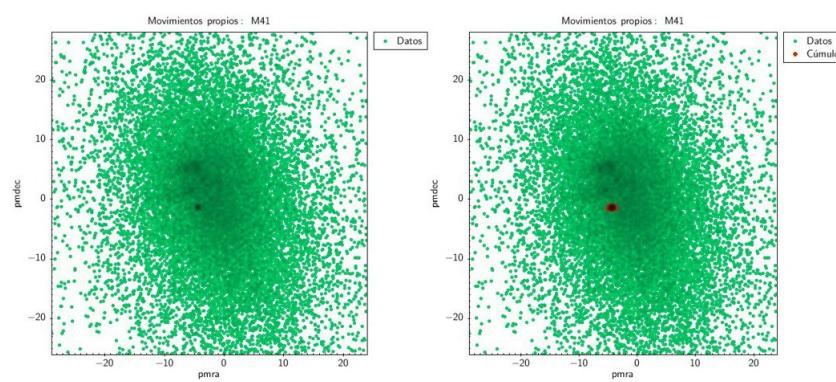
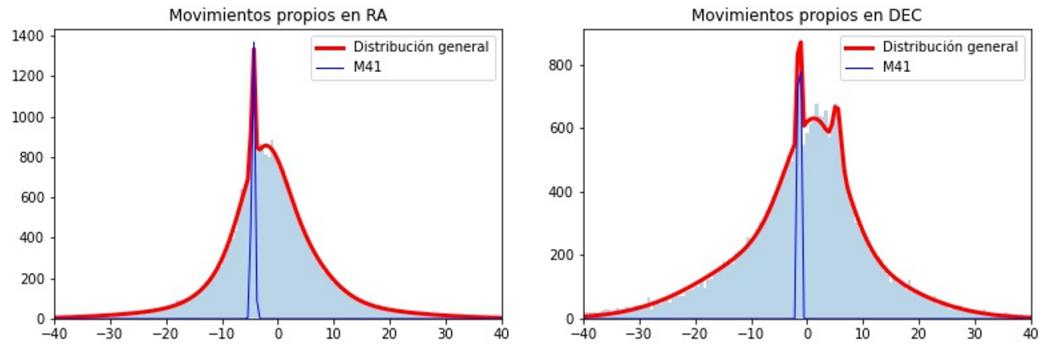


FIGURA 15: Diagrama HR para Las Híades.

## M41



## Coma Berenice

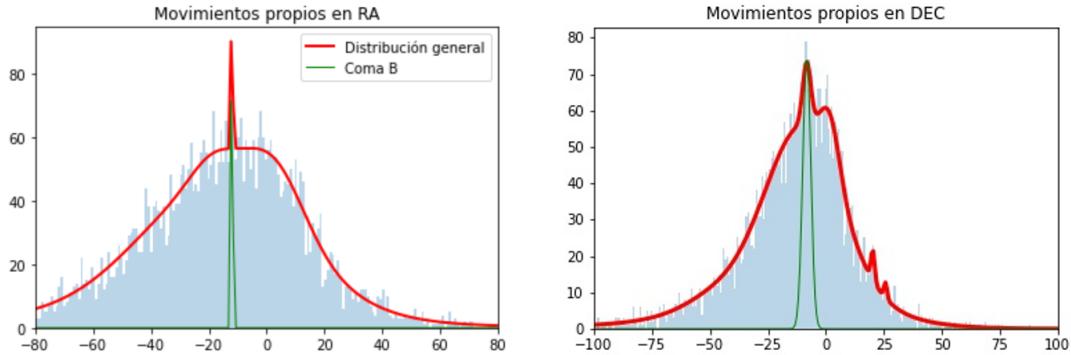


FIGURA 19: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para Coma Berenice.

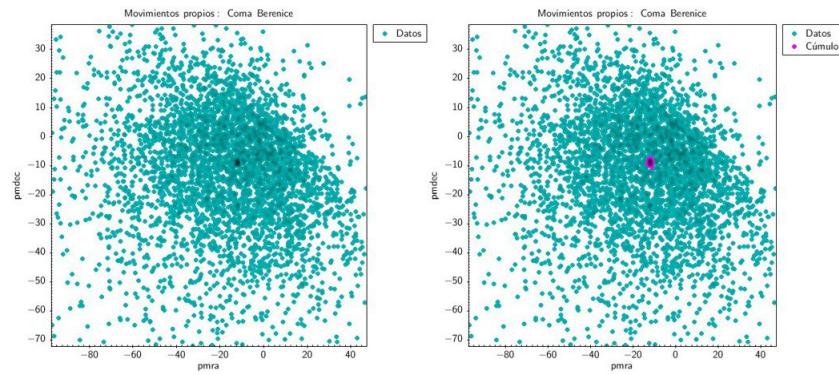


FIGURA 20: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para Coma Berenice. En verde los datos iniciales y en fucsia los miembros del cúmulo.

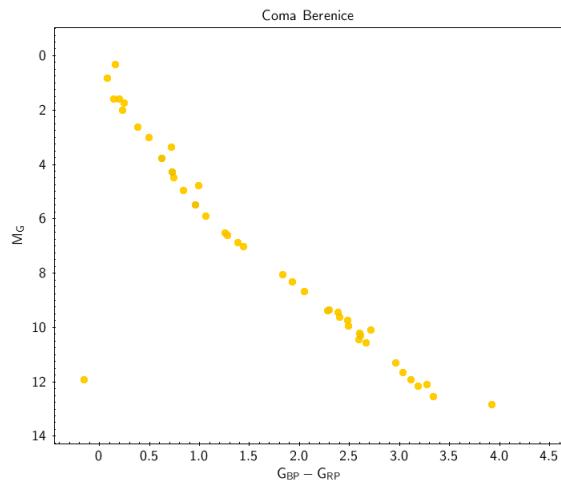


FIGURA 21: Diagrama HR para Coma Berenice.

## h y $\chi$ Persei

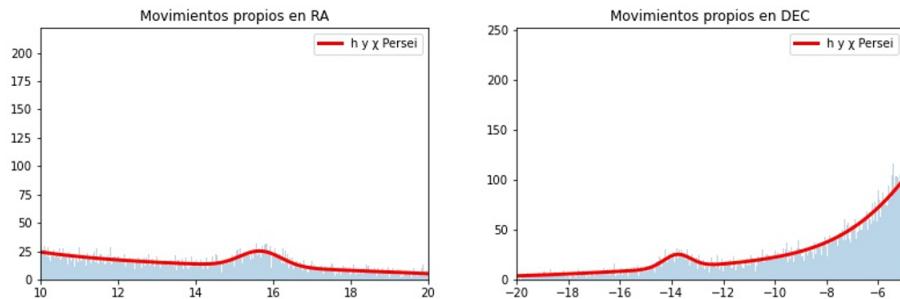


FIGURA 22: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para h y  $\chi$  Persei.

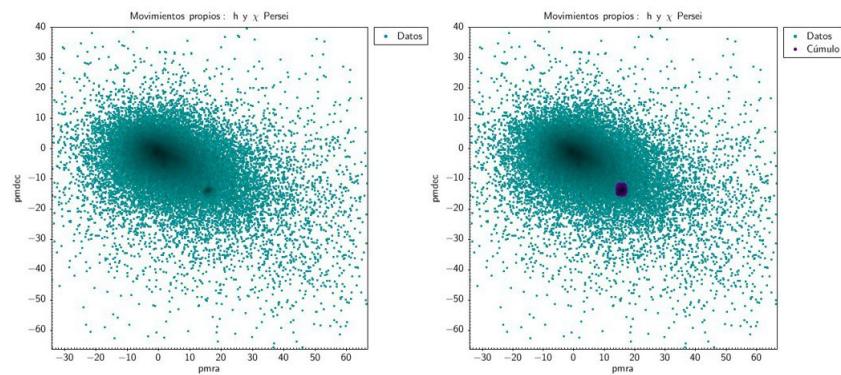


FIGURA 23: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para h y  $\chi$  Persei. En verde los datos iniciales y en azul los miembros del cúmulo.

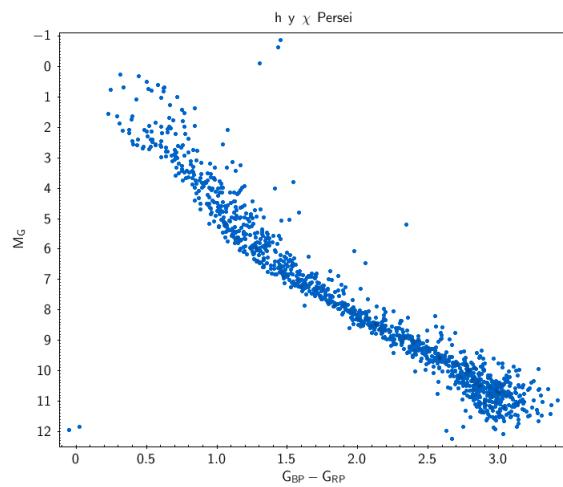


FIGURA 24: Diagrama HR para h y  $\chi$  Persei.

## M92

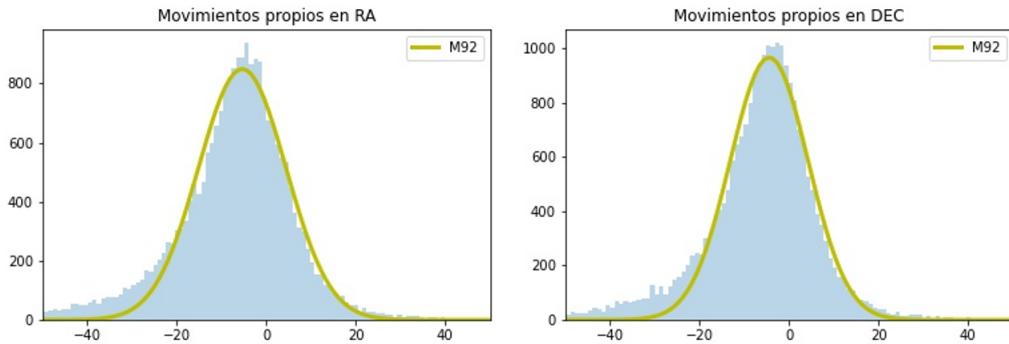


FIGURA 25: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M92.

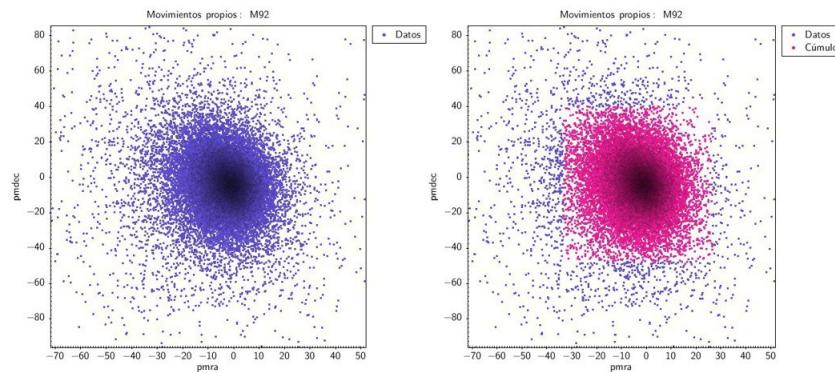


FIGURA 26: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para M92. En azul los datos iniciales y en rosado los miembros del cúmulo.

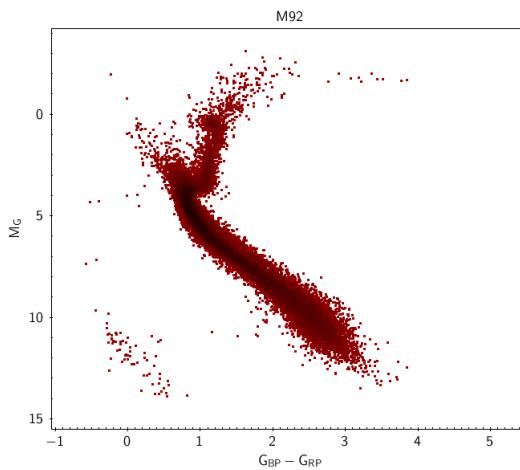


FIGURA 27: Diagrama HR para M92.

## M13

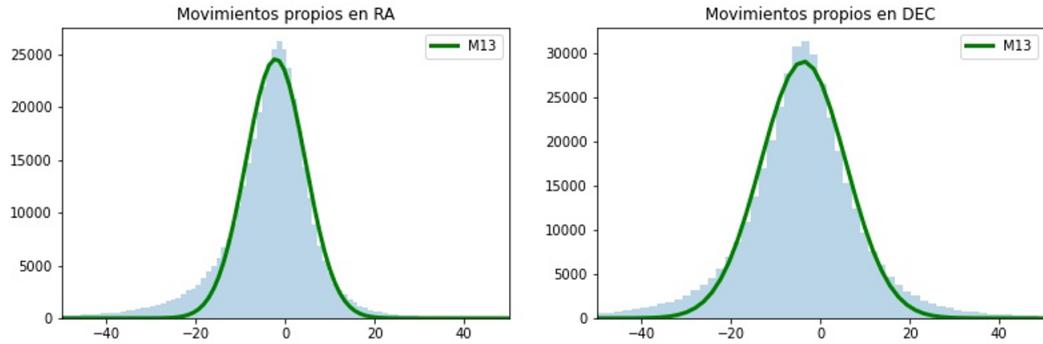


FIGURA 28: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M13.

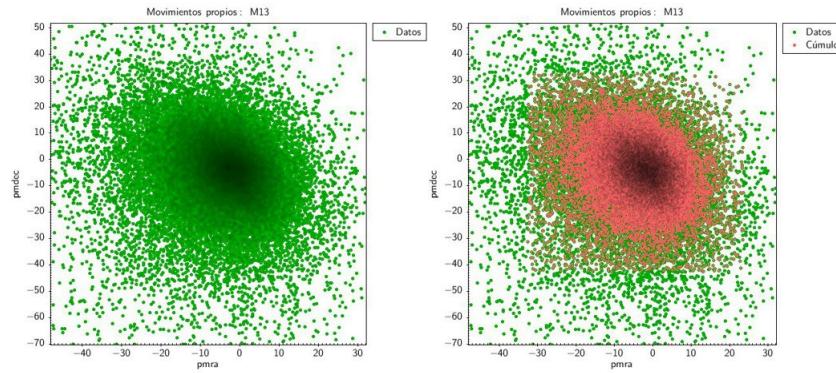


FIGURA 29: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para M13. En verde los datos iniciales y en salmón los miembros del cúmulo.

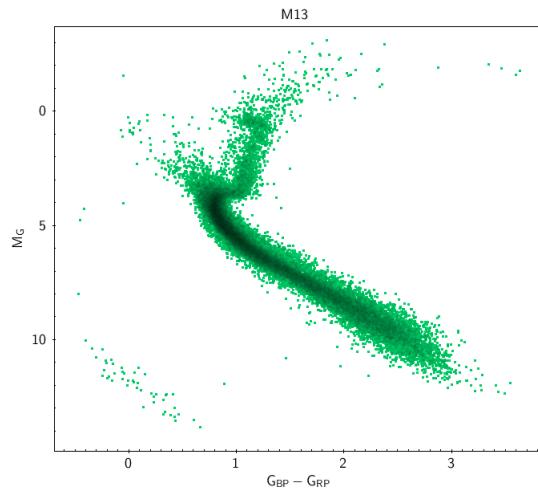


FIGURA 30: Diagrama HR para M13.

## M5

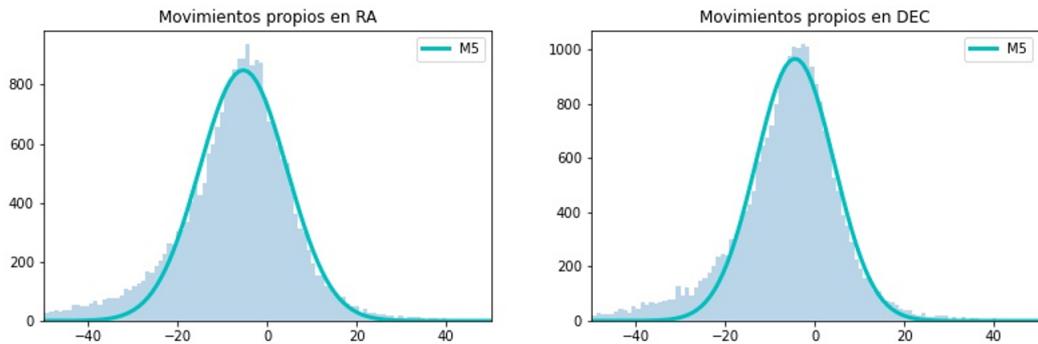


FIGURA 31: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M5.

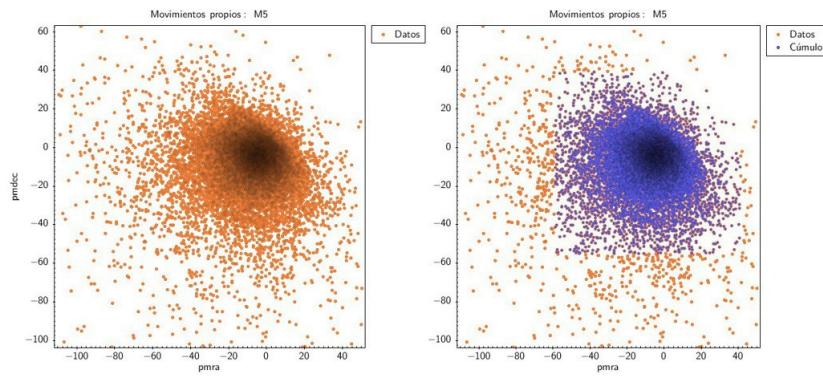


FIGURA 32: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para M5. En naranja los datos iniciales y en azul los miembros del cúmulo.

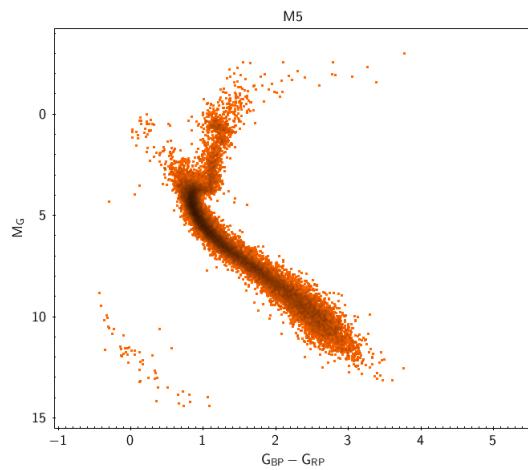


FIGURA 33: Diagrama HR para M5.

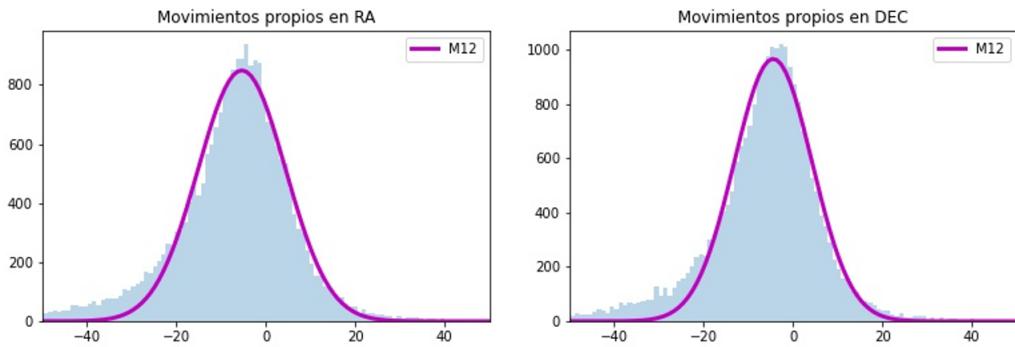
**M12**

FIGURA 34: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M12.

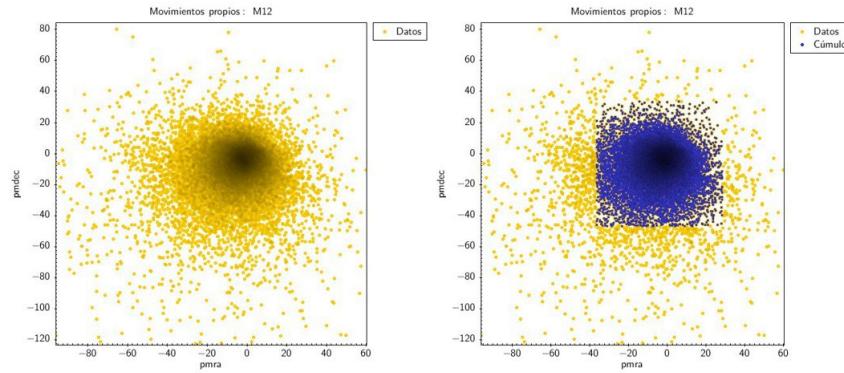


FIGURA 35: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para M12. En amarillo los datos iniciales y en azul los miembros del cúmulo.

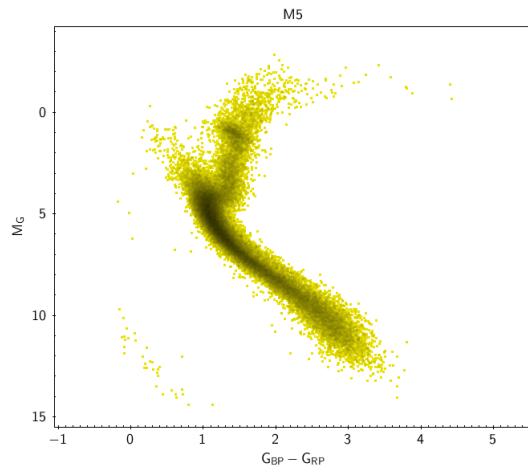


FIGURA 36: Diagrama HR para M12.

## M30

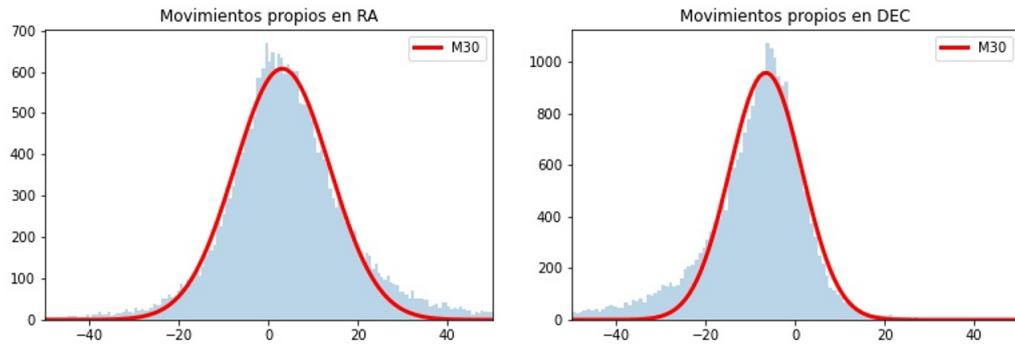


FIGURA 37: Histograma de movimientos propios en RA y DEC para M30.

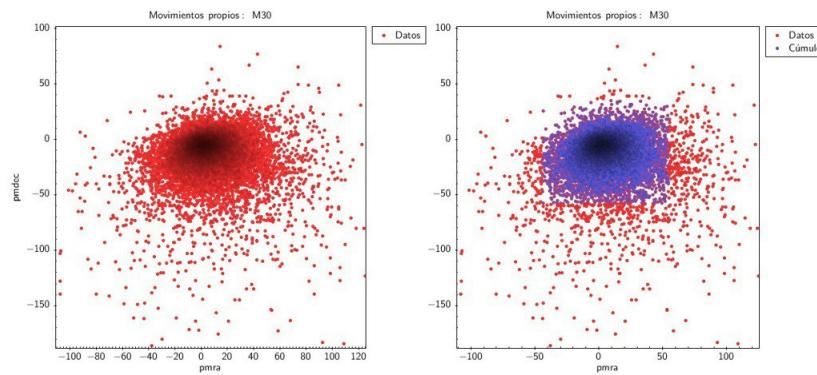


FIGURA 38: Diagramas de movimientos propios en RA y DEC para M30. En rojo los datos iniciales y en azul los miembros del cúmulo.

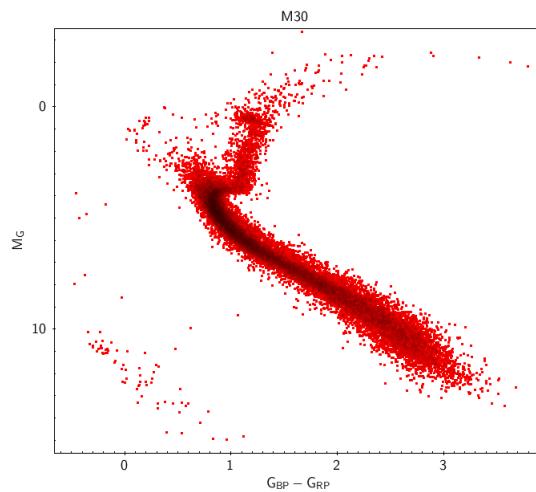


FIGURA 39: Diagrama HR para M30.