

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y ASTROFÍSICA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Código de TFG: FTA21

Estudio de diagramas color-magnitud con datos de Gaia

Study of colour-magnitude diagrams with Gaia data

Supervisor/es: David Montes Gutiérrez, Christian Duque Arribas

Arturo Pérez Roncero

Grado en Física

Curso académico 2023-24

Convocatoria Ordinaria

Resumen:

En este trabajo se ha realizado una introducción al método de determinación de parámetros estelares a partir del ajuste de datos del catálogo de Gaia DR3 a isocronas teóricas. Para ello se seleccionaron 6 cúmulos abiertos de la vecindad solar con parámetros de pertenencia tabulados en la literatura. Después se analizaron los datos observacionales mediante un software de ajuste bayesiano (ASteCa), que ajustó los datos a conjuntos de isocronas de distintas fuentes (PARSEC, MIST y BASTI). Se obtuvo así estimaciones de la extinción, la distancia, la edad y la metalicidad de los 6 cúmulos. Los resultados de los ajustes están de acuerdo con los valores de la literatura para dichos cúmulos.

A su vez, se realizó un estudio preliminar de las distintas isocronas empleadas. Finalmente, se utilizaron los datos de Gaia de la extinción y el enrojecimiento para construir diagramas color-magnitud de los cúmulos, y se llevó a cabo una comparación entre los efectos observacionales de la edad y la metalicidad en las estrellas.

Abstract:

This study has carried out an introduction to a novel method of stellar parameter determination, via isochrone fittings of observational data from the Gaia DR3 catalog. 6 open clusters were selected from the solar neighborhood, with pertenencia parameters previously tabulated in other studies. The measurements from Gaia were then analyzed using Bayesian fitting software (ASteCa), which fitted the data to sets of isochrones from different sources (PARSEC, MIST, and BASTI). Estimates of the extinction, distance, age and metallicity of the 6 clusters were thus obtained. The final results are in agreement with the values of other studies for these same clusters.

A preliminary study of the different isochrones used was also carried out. Finally, Gaia extinction and reddening measurements were used to construct color-magnitude diagrams of the clusters, and a comparison between the observational effects of age and metallicity on stars was carried out.

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 3 |
| 2. Marco Teórico | 3 |
| 2.1. La misión Gaia | 3 |
| 2.2. Cúmulos Abiertos | 4 |
| 2.2.1. Formación y Utilidad | 4 |
| 2.2.2. Pertenencia | 5 |
| 3. Metodología | 7 |
| 3.1. Selección de los datos | 7 |
| 3.1.1. Selección de cúmulos | 7 |
| 3.1.2. Selección de estrellas | 8 |
| 3.2. Parámetros libres de interés | 9 |
| 3.2.1. Metalicidad | 9 |
| 3.2.2. Edad | 10 |
| 3.2.3. Extinción | 11 |
| 3.2.4. Distancia | 12 |
| 3.3. Isocronas | 12 |
| 3.4. Ajuste estadístico | 12 |
| 4. Resultados y discusión | 14 |
| 4.1. Extinción, distancia, edad y metalicidad a partir de ajustes de isocronas con ASteCa | 14 |
| 4.1.1. Cúmulos jóvenes NGC 6705 y NGC 6281 | 14 |
| 4.1.2. Cúmulos de edades intermedias NGC 2355 y NGC 6802 | 16 |
| 4.1.3. Cúmulos viejos M67 y NGC 2243 | 17 |
| 4.2. Magnitudes absolutas a partir de datos de Gaia | 18 |
| 5. Conclusiones | 19 |

1. Introducción

A lo largo de toda su historia, la astronomía ha estado limitada a un único sistema de referencia desde el cual estudiar los astros: la Tierra. Es fácil ver como esta restricción dificulta enormemente la labor de los científicos. En los comienzos de la revolución científica, fue esta falta de perspectiva la que causó tantos estragos a la hora de desarrollar un modelo para el sistema solar que se ajustase a las observaciones. Si de alguna forma los astrónomos de la Edad Antigua hubiesen tenido a su disposición mediciones de los movimientos de los planetas tomadas desde Próxima Centauri, es probable que se hubiese obtenido un modelo heliocéntrico mucho antes de lo que se hizo en realidad. De la misma forma, los astrofísicos estelares contemporáneos, todavía obligados a realizar observaciones desde un único punto en el espacio, deben ingeniárselas para salvaguardar su falta de perspectiva, y obtener parámetros estelares por métodos indirectos.

Las estrellas son fenómenos aparentemente simples, siempre que se observen desde una distancia precavida. Si realizamos todas las simplificaciones pertinentes, aproximando una estrella a una esfera estática en equilibrio hidrostático, sin campos magnéticos, sin rotación, sin atmósfera estelar, etc... y tomamos como variable independiente la masa (m), la evolución y estructura estelar se reducen a un sistema dinámico de 5 ecuaciones diferenciales. Las variables dependientes serían, para cortezas esféricas de masa m : su radio, su presión, su luminosidad, su temperatura, y su composición química.

Estas ecuaciones son ya de por sí un reto para resolver, pero el verdadero problema radica en hallar las distintas funciones y parámetros estelares que residen en sus interiores. Entre otras, la función de densidad, el calor específico, el factor adiabático, la producción energética, o la opacidad. Esta última, por ejemplo, es el resultado de una infinidad de procesos que toman lugar en el interior estelar. Desde excitaciones de átomos neutros a radiación Bremsstrahlung, los fenómenos físicos que rigen la opacidad del medio estelar son tan variados y difíciles de modelar de forma universal, que en la mayoría de simulaciones estelares se recurre a la incorporación en el modelo de extensas tablas de valores tabulados para composiciones y regímenes energéticos concretos (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012d).

Las estrellas, incluso en su concepción más simplificada, resultan ser el equilibrio de una gran cantidad de incógnitas. Calibrar mediante modelos numéricos dichas incógnitas a partir de los escasos datos accesibles mediante observaciones directas es muy complicado. Es por esto que se recurre a métodos alternativos para obtener de los datos directos, como la magnitud o el color, medidas indirectas como la edad o la metalicidad.

El objetivo de este trabajo es ilustrar de forma introductoria uno de los principales métodos modernos para estimar parámetros estelares: el ajuste estadístico de cúmulos estelares abiertos. Concretamente, se realizarán ajustes por isocronas de 6 cúmulos abiertos en la vecindad solar de distintas edades y metalicidades a partir de datos de la misión Gaia.

2. Marco Teórico

2.1. La misión Gaia

Lanzado el 19 de Diciembre de 2013 por la Agencia Espacial Europea (ESA), el satélite Gaia (Gaia Collaboration et al. 2016) ha medido hasta la fecha la magnitud aparente, color, composición, y movimiento aparente de miles de millones de estrellas cercanas a la Tierra¹. Su último catálogo estelar publicado, Data Release 3 (DR3)², ofrece una oportunidad inédita a los astrónomos de obtener parámetros estelares de objetos concretos a partir de proxies medidos por Gaia (ya sea

¹<https://sci.esa.int/web/Gaia>

²<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>

de enanas blancas (Tremblay et al. 2024), objetos variables (Gavras et al. 2023), o candidatos a sistemas binarios de agujeros negros y gigantes rojas (El-Badry et al. 2023). Además, permite calibrar de forma precisa modelos estelares teóricos a partir del análisis estadístico de binarias o cúmulos estelares.

En este trabajo se utilizarán datos concretos del DR3³. En primer lugar, se utilizarán sus medidas astrométricas, concretamente el paralaje, la posición, y los movimientos estelares propios, que ayudarán a identificar las estrellas de interés. Por otro lado, Gaia cuenta con dos tipos de bandas fotométricas: azules (que operan entre longitudes de onda de 330 y 680 nm) y rojos (entre 640 y 1050 nm). A partir de ellos se puede obtener en conjunto la magnitud aparente en la banda G (330-1050 nm), y el índice de color (calculado a partir de la diferencia de magnitud entre las dos bandas). Gaia también aporta una estimación de la extinción para la mayoría de sus medidas, así como de su distancia.

Gaia ofrece análisis espectroscópicos de baja resolución para estrellas con una magnitud inferior a 12, lo que permita calcular su composición química. Sin embargo, sus estimaciones de la metalicidad son poco precisas, especialmente para estrellas de masa muy baja (de clases espectrales GKM), que producen espectros muy complejos plagados de líneas de absorción atómicas, e incluso moleculares. Con tal de combinar los datos astrométricos de Gaia con datos espectroscópicos de alta resolución, se inició la Gaia-ESO Survey (Gilmore et al. 2012)⁴, que utiliza el espectrógrafo de fibras FLAMES (Fibre Large Array Multi Element Spectrograph) en el Very Large Telescope (VLT), parte de ESO (European Southern Observatory) en Chile. La unión de la misión Gaia con exploraciones espectroscópicas permite un mucho mejor ajuste de los modelos teóricos a los datos observacionales.

2.2. Cúmulos Abiertos

2.2.1. Formación y Utilidad

Las estrellas son el resultado del colapso de nubes de gas suficientemente frías y densas como para ser incapaces de amortiguar oscilaciones acústicas en su medio (Jeans y Darwin 1902). Esta condición es la llamada inestabilidad de Jeans. La masa de Jeans es la masa mínima que necesita una nube de temperatura (T) y densidad (ρ) dadas para colapsar (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012g).

$$M_J = \frac{27\sqrt{3}}{16\sqrt{\pi}\alpha^{3/2}} \left(\frac{\mathfrak{R}}{G\mu} \right)^{3/2} \left(\frac{T^3}{\rho} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Las nubes de gas típicas en el medio interestelar de nuestra galaxia capaces de colapsar tienen masas mucho mayores a las de las estrellas típicas. Esto se debe a un proceso de fragmentación que sigue al colapso inicial, que se puede aproximar como isoterma siempre que su composición y densidad garantice que no es opaco a su propia radiación de cuerpo negro. Al crecer la densidad, y ser la temperatura constante, la dependencia de la masa de Jeans respecto a estos parámetros garantiza que esta irá disminuyendo con el tiempo, permitiendo colapsos independientes dentro de la nube. Esta fragmentación en nubes más pequeñas finaliza una vez la densidad de los fragmentos es suficientemente alta como para reabsorber sus propias emisiones térmicas, y pasar de un colapso isoterma a uno adiabático, que frena la disminución de la masa de Jeans.

Esta fragmentación es el motivo por el que la gran mayoría de estrellas en la galaxia se formaron en cúmulos estelares abiertos, a partir de la misma nube inicial, y por lo tanto, a partir de gas con contenidos químicos muy similares. Si somos capaces de identificar las estrellas integrantes de un

³<https://www.cosmos.esa.int/web/Gaia/science-performance#photometric%20performance>

⁴<https://www.Gaia-eso.eu/>

cúmulo abierto (un problema nada trivial que se explorará más adelante), seremos capaces de ajustar nuestras observaciones de dicho cúmulo a un modelo de poblaciones estelares simple, en el que hay poca variabilidad en la metalicidad entre estrellas, todas tienen edades muy similares, y sus movimientos propios son parecidos.

Las estrellas en cúmulos abiertos se diluyen en el medio interestelar con el tiempo, separándose de sus hermanas. En algunos casos, estrellas nacidas en distintos cúmulos pueden quedar ligadas gravitacionalmente en cúmulos globulares. Estos no son tan útiles como los cúmulos abiertos a la hora de determinar parámetros estelares, ya que sus estrellas integrantes pueden tener metalicidades y edades muy dispares.

2.2.2. Pertenencia

Pertenencia es el término utilizado en la literatura para denominar la probabilidad de que una estrella pertenezca a un grupo dado. A continuación se describe brevemente el procedimiento utilizado en (Gutiérrez Albarrán et al. 2024) para determinar la pertenencia. Más adelante si utilizarán los datos de dicho artículo para el ajuste final de los datos experimentales.

A partir de datos astrométricos El primer paso para determinar la pertenencia de estrellas consiste en analizar sus movimientos propios. Los cúmulos abiertos son suficientemente jóvenes como para poder asumir con cierto grado de confianza que la gran mayoría de las estrellas que lo componen se mueven a velocidades relativas a la Tierra muy similares. Al representar en un diagrama de fases todas las estrellas circundantes a un cúmulo conocido, las estrellas integrantes aparecerán agrupadas, separadas del resto (Figura 1b).

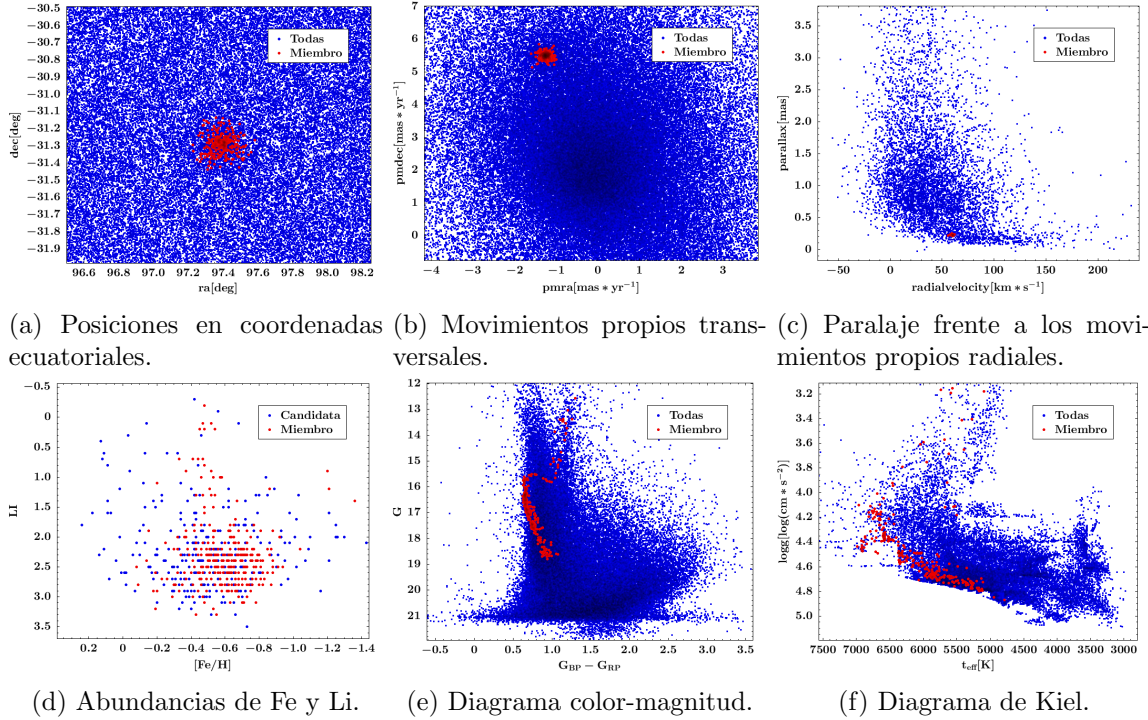


Figura 1: Ejemplos para la determinación de la pertenencia en TopCat. Datos de Gaia y GES para NGC 2243.

Este método es, por supuesto, propenso a errores. Si restringimos el paralaje (Figura 1c) a valores no muy dispares respecto a la media del grupo, podemos limitar la cantidad de estrellas

contaminantes, ya que las integrantes reales no se habrán alejado mucho entre ellas. A su vez, se puede también acotar la velocidad radial de las estrellas (Figura 1c), si se dispone de datos espectroscópicos a partir de los cuales se puede medir el efecto Doppler.

Estrellas contaminantes A pesar de contar con datos más precisos que nunca, el procedimiento anterior no garantiza una medición de la pertenencia perfectamente certera. Por ejemplo, estrellas con magnitudes aparentes bajas, ya sea por una alta extinción galáctica en esa dirección, por ser una estrella muy lejana, o por ser de una clase espectral muy tardía; pueden tener movimientos aparentes con mucho error. En caso de ser falsos positivos, pueden contaminar los resultados del ajuste de los datos. Sin embargo, limitar la magnitud aparente limita la edad máxima de los cúmulos que se pueden estudiar, ya que para cúmulos envejecidos la mayoría de las estrellas restantes son las de menor luminosidad. La edad mínima también debe acotarse, comúnmente a los 10 millones de años, debido a la posible contaminación por estrellas en la pre-secuencia principal (Bossini et al. 2019).

Existen además ciertos tipos de estrellas que, debido a circunstancias anormales, no evolucionan de forma predecible por los modelos actuales. A estas estrellas se las suele denominar *blue stragglers*, ya que suelen tener temperaturas efectivas más calientes (más azules) de lo que sugiere su luminosidad y edad, estando desplazadas en los diagramas HR más allá del punto de giro de su grupo estelar. Se especula (Perets y Fabrycky 2009) que estas estrellas pueden resultar ser objetos con velocidades de rotación elevadas en torno a su propio eje, binarias con transferencia de masa entre ellas, o incluso el resultado de fusiones de estrellas.

A las *blue stragglers* hay que añadir otros tipo de estrellas problemáticas, como las red stragglers (más luminosas y más rojas de lo esperado) y las sub-subgigantes (Geller et al. 2017)(menos luminosas y más rojas de lo esperado). Se desconocen los fenómenos que dan lugar a estos comportamientos anómalos, pero se especula que puede ser debido también a interacciones entre binarias, o incluso a la captura de agujeros negros primordiales durante la formación estelar (Caplan, Bellinger y Santarelli 2024).

A todas estas estrellas contaminantes se las puede identificar acotando las regiones de estudio en diagramas de Hertzsprung-Russel y de Kiel. En los diagramas de Hertzsprung-Russel (Figura 1e), o diagrama color magnitud (CMD por sus siglas en inglés), se representa la magnitud de las estrellas respecto a su índice de color. En nuestro caso se utilizarán las bandas fotométricas utilizadas por Gaia, M_G para la magnitud, y $M_{GBP} - M_{GRP}$ para el índice de color. Cualquier estrella sospechosa de no pertenecer al cúmulo, con color o luminosidad anómalas, estará distanciada del resto, permitiendo su identificación. A su vez, los diagramas de Kiel (Figura 1f), que representan la intensidad del campo gravitatorio en la superficie de la estrella respecto a su temperatura superficial, permiten identificar fácilmente a estrellas gigantes contaminantes.

Haciendo uso de los datos de Gaia-ESO se puede también acotar el contenido metálico (Figura 1d), excluyendo cualquier estrella que se salga de la norma del cúmulo.

Por último, es posible contrastar los parámetros de la pertenencia calculados con los obtenidos por otros autores.

Estrellas binarias Además de la binarias astrométricas, las binarias ópticas (aquellas no resueltas por telescopios), pueden contaminar los datos, ya que mezclan los espectros de dos estrellas de propiedades distintas, resultando en la observación efectiva de una estrella ficticia que no se ajusta a los modelos. Con tal de tener en cuenta los efectos de dichas binarias, se introduce en los modelos teóricos de síntesis de poblaciones estelares una fracción de estrellas que se observe como lo haría un sistema binario.

3. Metodología

El método utilizado en este trabajo para la estimación de parámetros estelares a partir de los datos de Gaia es el de ajuste estadístico por isocronas. Este consiste en minimizar la diferencia entre una curva teórica y los datos astronómicos de las estrellas integrantes de un cúmulo (comúnmente su magnitud y su color, en un diagrama de Hertzsprung-Russel). Al tratar con cúmulos abiertos, todas las estrellas tienen edades muy similares, y la curva teórica a la que se ajustarán los datos será una isocrona. Dicha curva une todos los puntos en un CMD en los que puede estar una estrella de masa variable y de edad y metalicidad dadas. Más adelante se explicará más a fondo el uso de las isocronas.

3.1. Selección de los datos

3.1.1. Selección de cúmulos

Con tal de ilustrar las diferencias que produce la edad y la metalicidad en las estrellas, se eligieron de entre los cúmulos catalogados en el estudio de GES (Gutiérrez Albarrán et al. 2024) parejas de cúmulos estelares con la misma edad y metalicidad dispar. A continuación se especifica qué cúmulos abiertos se estudiaron, así como sus parámetros en la literatura. Concretamente, los estudios utilizados para comparar con los resultados de este trabajo son, a parte de (Gutiérrez Albarrán et al. 2024):

- (Kharchenko et al. 2012), donde utilizan datos del catálogo 2MASS⁵ en el infrarrojo para determinar la pertenencia, la distancia, la edad, y la metalicidad de una variedad de cúmulos.
- (Loktin y Popova 2017), donde determinan el enrojecimiento, la distancia y la edad a partir de datos de 2MASS.
- (Cantat-Gaudin et al. 2020), donde utilizan datos del catálogo Gaia DR2, una versión anterior al utilizado en este trabajo, para determinar mediante redes neuronales el enrojecimiento, la distancia y la edad de miles de cúmulos.
- (Bossini et al. 2019), donde utilizan datos del catálogo Gaia DR2 ajustados a isocronas teóricas mediante BASE-9 (von Hippel et al. 2006, un programa de ajuste estadístico bayesiano, para determinar la edad, la distancia y la extinción de cientos de cúmulos.
- (Dias et al. 2021), donde utilizan datos del catálogo Gaia DR2 ajustados a isocronas teóricas mediante un software propio para determinar la edad, la metalicidad, la distancia y la extinción de cientos de cúmulos.
- (Hunt y Reffert 2023), donde utilizan datos del catálogo Gaia DR3 para realizar un análisis estadístico de la pertenencia de miles de cúmulos, y para determinar su edad, distancia y extinción.
- (Donor et al. 2020), un catálogo de metalicidades galáctico determinado mediante datos de SDSS/APOGEE DR16 (Majewski et al. 2017, un sondeo de las grandes poblaciones estelares de la Vía Láctea en el infrarrojo.
- (Tarricq et al. 2022), donde utilizan datos del catálogo EDR3 para extender las tablas de pertenencia de estudios anteriores, y obtener distancias y edades actualizadas.

⁵<https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/2mass.html>

- (He et al. 2022), donde utilizan datos del catálogo EDR3 para analizar cúmulos de alta latitud galáctica, subrepresentado en la mayoría de catálogos. Obtienen la extinción y la edad mediante el ajuste de isocronas.

A continuación se concretan los nombres de los cúmulos elegidos. Se pueden ver las tablas completas con los datos recopilados de la literatura en este enlace⁶.

Cúmulos jóvenes Los cúmulos jóvenes (~ 300 millones de años) considerados en este trabajo son NGC 6705, un grupo rico en metales en la constelación Scutum, también conocido como M11, o Cúmulo del Pato Salvaje⁷; y NGC 6281, un grupo más pobre en la constelación de Scorpius⁸.

Cúmulos de edades intermedias Los cúmulos de edades intermedias (~ 1000 millones de años) estudiados son NGC 2355, un cúmulo muy pobre en metales en la constelación de Gemini⁹; y NGC 6802, un cúmulo mucho más rico en metales.

Cúmulos viejos Por último, la pareja de cúmulos con edades más avanzadas (~ 4000 millones de años) elegidos para estudiar son NGC 2243, muy pobre en metales; y M67, en la constelación de Cáncer¹⁰.

3.1.2. Selección de estrellas

El primer problema que se debe afrontar a la hora de realizar un ajuste por isocronas es determinar qué estrellas concretas dentro de un cúmulo se van a ajustar. Como se ha explorado en secciones anteriores, la pertenencia es un parámetro difícil de determinar. En primer lugar, a pesar de contar con datos más precisos que nunca antes, los errores relativos de las posiciones y velocidades de algunas estrellas, concretamente aquellas especialmente lejanas o tenues, son demasiado grandes como para poder concluir si realmente pertenecen a un cúmulo o no. Si se decide ignorar dichas estrellas problemáticas, se estaría subestimando la población poco masiva del cúmulo, lo cual afectaría a la edad y metalicidad resultantes del ajuste. Por último, a pesar de ser una minoría, es necesario recordar que algunas estrellas, denominadas *stragglers*, no se amoldan a los modelos teóricos utilizados para calcular la curva isocrona, y por tanto deben ser excluidas del ajuste.

Como se ha comentado en secciones anteriores, en este trabajo se han utilizado los datos publicados en (Gutiérrez Albarrán et al. 2024) para determinar la pertenencia. El programa utilizado para el tratamiento de datos es TopCat (Taylor 2005), que ofrece la opción de importar los datos de Gaia directamente desde TAP¹¹, así como la posibilidad de importar tablas externas con la pertenencia.

Utilizando la función interna de TopCat *Cone Search*, se importó al programa los datos de Gaia de todas las estrellas de una región del cielo de unas decenas de minutos de arco para todos los cúmulos. Después, utilizando la función *Cross Match*, se pudo aislar en los datos de Gaia las estrellas catalogadas en (Gutiérrez Albarrán et al. 2024) como miembros del cúmulo, obteniendo sus magnitudes, colores, extinciones y enrojecimientos.

⁶<https://drive.google.com/drive/folders/13fJNp2VbKq-cozvJZBTJBWkdmA4LfIZt?usp=sharing>

⁷https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%BAmulo_del_Pato_Salvaje

⁸https://en.wikipedia.org/wiki/NGC_6281

⁹https://en.wikipedia.org/wiki/NGC_2355

¹⁰https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%BAmulo_abierto_M67

¹¹<https://Gaia.aip.de/>

3.2. Parámetros libres de interés

Como ya se ha explicado previamente, la intención de este trabajo es obtener estimaciones de parámetros estelares de las integrantes de cúmulos abiertos a partir de mediciones de sus magnitudes aparentes en varias bandas fotométricas. Dichos parámetros estelares son concretamente la edad, la metalicidad, la extinción, y la distancia.

3.2.1. Metalicidad

La *metalicidad* de una estrella es el nombre que se le da a la abundancia de elementos que no son ni hidrógeno ni helio. Si se dispone de una medición espectroscópica de alta resolución de la estrella en cuestión, es posible medir el contenido químico de ciertos elementos concretos, o incluso de ciertas moléculas. Sin embargo, en este trabajo se utilizará como trazador de la metalicidad únicamente la abundancia de hierro.

Típicamente, la metalicidad se mide en *dex*, o *decimal exponent*¹², que describe en escala logarítmica el contenido de hierro en una estrella respecto a la abundancia en el Sol.

$$\left[\frac{\text{Fe}}{\text{H}} \right] = \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\star} - \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right) \quad (2)$$

El valor utilizado en este trabajo para la abundancia del Sol es:

$$\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} = 0,0152 \quad (3)$$

Los efectos que pueden tener distintas especies químicas en el comportamiento de las estrellas son variados, y muchas veces difíciles de modelar, ya que los regímenes de temperatura y presión en el interior estelar son irreproducibles experimentalmente, y los modelos teóricos son incompletos para sistemas químicos tan complejos. Sin embargo, existe un factor dependiente de la metalicidad aplicable a la mayoría de estrellas: la opacidad del ion H^{-} .

Una estrella es, en esencia, un gran esferoide de plasma capaz de soportar su peso gracias a la energía producida en su núcleo mediante fusión nuclear. Para poder mantenerse en equilibrio dinámico y térmico, es necesario un mecanismo de transporte de energía que transfiera la luminosidad producida en el núcleo hacia fuera. Las condiciones necesarias para que se mantenga dicho equilibrio vienen dadas por el criterio de Ledoux (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012e):

$$\nabla_{\text{ad}} < \nabla < \nabla_{\text{ad}} + \frac{\varphi}{\delta} \nabla_{\mu} \quad (4)$$

Donde ∇ es el gradiente de la temperatura respecto a la presión, ∇_{ad} es el gradiente de la temperatura respecto a la presión para el caso adiabático (sin transferencia de calor entre niveles), y ∇_{μ} es el gradiente del potencial químico respecto a la presión:

$$\nabla := \left(\frac{d \ln T}{d \ln P} \right) \quad (5)$$

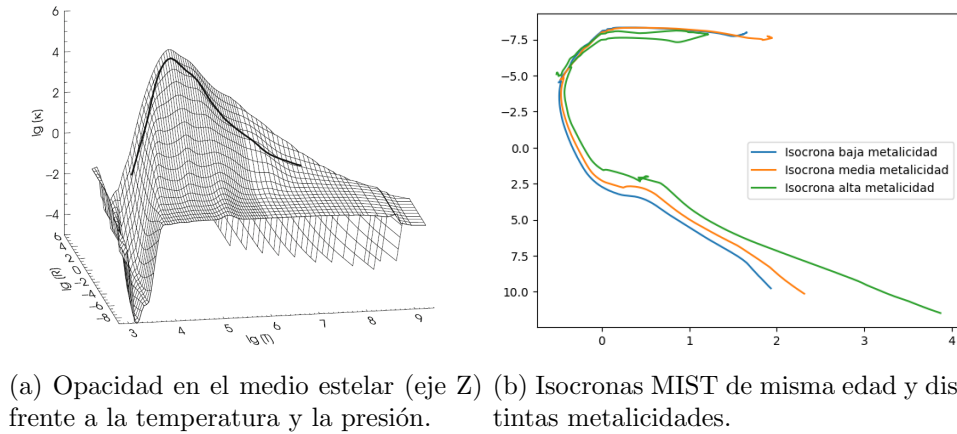
$$\nabla_{\mu} := \left(\frac{d \ln \mu}{d \ln P} \right)_{\text{s}} \quad (6)$$

De las relaciones anteriores se puede extrapolar que en una estrella donde ∇ viene dado por el transporte de energía mediante fotones (transporte radiativo), es decir $\nabla = \nabla_{\text{rad}}$, la estrella se mantendrá en equilibrio siempre que el gradiente que produzca la transferencia de energía sea menor al correspondiente a una masa de gas ascendiendo sin transferir calor con su entorno (obviando el

¹²[https://en.wikipedia.org/wiki/Dex_\(decimal_exponent\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dex_(decimal_exponent))

gradiente químico, despreciable en la mayoría de casos). Sin embargo, si la resistencia del medio al paso de los fotones (opacidad κ) es demasiado elevada, o si la producción de energía es demasiado alta como para transmitirla mediante fotones, se cumple $\nabla < \nabla_{rad}$, y se pierde el equilibrio. La estrella comienza a mover la energía mediante el desplazamiento físico de material estelar en zonas convectivas, reestructurando su interior.

La metalicidad puede producir cambios visibles en la estrella si es capaz de afectar a ∇ , desplazando los límites de las capas radiativas y convectivas, modificando su funcionamiento interno, y afectando por tanto a su luminosidad y temperatura vistas desde fuera. Como se ha mencionado previamente, la metalicidad puede afectar notablemente a la opacidad del ion H^- , producida por la captura electrónica, y consecuente ionización de átomos de H neutros (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012d). La opacidad del ion H^- esta afectada por la temperatura y por la densidad electrónica. Si la temperatura es demasiado elevada, los átomos de H se ionizan, imposibilitando la captura de electrones. Pero si la temperatura es demasiado baja, la densidad de electrones libres decrece, quedando capturados en átomos y moléculas. Los metales disponen de muchos electrones débilmente ligados, que pueden ser liberados al medio estelar a muy bajas temperaturas, potenciando la opacidad del ion H^- . Por tanto, la opacidad del ion H^- domina en regiones frías y densas, y produce la protuberancia en el medio de la Figura 2a, llamada comúnmente la *montaña kappa* (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012d).



(a) Opacidad en el medio estelar (eje Z) (b) Isocronas MIST de misma edad y distintas metalicidades.

Figura 2: Efectos de la metalicidad en las estrellas.

Los efectos concretos de la metalicidad en la posición de las estrellas en un CMD son los siguientes:

1. En el núcleo, la ausencia de metales disminuye la opacidad hasta el punto en el que la producción de energía es demasiado elevada como para ser transportada por fotones, produciendo una región convectiva, y aumentando la luminosidad de la estrella, elevándola en el CMD (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012b).
2. En la atmósfera estelar, un mayor contenido metálico aumenta el peso molecular medio, disminuyendo la energía cinética de las partículas, desplazando la estrellas hacia la derecha a regiones más frías (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012f).

3.2.2. Edad

Las estrellas permanecen durante la mayor parte de su vida en la llamada *secuencia principal*, durante la cual fusionan hidrógeno en su núcleo de forma controlada. A medida que se agota el

hidrógeno en el núcleo, la estrella comienza una reestructuración de su disposición interna que la desplaza en el diagrama Hertzsprung-Russell. La evolución concreta de la estrella depende mucho de su masa y composición, pero la gran mayoría de estrellas comienzan una fase sub-gigante durante la cual se hacen más grandes y rojas a medida que la fusión de hidrógeno migra desde el núcleo a una capa circundante (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012a). Esto se observa en un CMD como un desplazamiento a la derecha. La estrella aglomera helio inerte en su núcleo hasta que se pierde el equilibrio térmico y las regiones centrales se calientan, incrementando el ritmo de fusión de hidrógeno, y por lo tanto su luminosidad, ascendiendo en el CMD por la rama de las gigantes rojas.

Existen más etapas de la evolución estelar, pero al ser estas muy breves en comparación con la secuencia principal, la cantidad de estrellas observadas en dichas fases es reducida. Cabe destacar que las estrellas de masa baja, una vez inician la fusión del He, se desplazan horizontalmente hacia regiones más calientes del CMD de forma muy lenta y fácilmente modelable, en torno a una región denominada *red clump*. Su lentitud se debe a que una menor masa implica una fusión de hidrógeno en capas más controlada. Su facilidad para ser modelado, por otro lado, se debe a que la temperatura de fusión del He es muy similar para todas las estrellas, por lo que sus estructuras interna serán también parecidas entre sí. Esto significa que al observar cúmulos estelares suficientemente envejecidos como para tener estrellas en la rama de las gigantes rojas, especialmente aquellos con un gran contenido metálico (Zhao, Qiu y Mao 2001), una porción considerable de las estrellas fuera de la secuencia principal se encontrarán en el *red clump*.

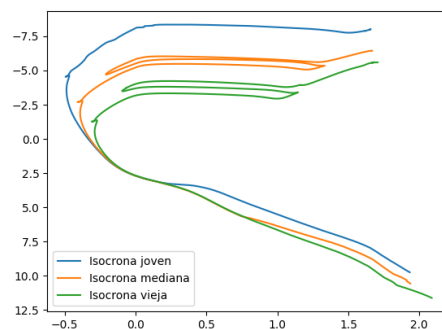


Figura 3: Isocronas MIST de misma metalicidad y distintas edades.

En rasgos generales, la morfología típica en un CMD de una población estelar simple (donde todas las estrellas tienen la misma edad y metalicidad) viene determinada por la secuencia principal: una diagonal gruesa de abajo a la derecha (estrellas de menor masa) a arriba a la izquierda (estrellas de mayor masa); seguida de un giro horizontal a la derecha (punto de giro) que da paso a la fase de sub-gigante; y finalmente una ascensión por la rama de las gigantes. Cuanto más envejecido sea el cúmulo, más y más estrellas de menor masa habrán finalizado su secuencia principal, y el punto de giro se irá desplazando hacia abajo a la derecha.

3.2.3. Extinción

La extinción es un parámetro astrofísico que mide los efectos del polvo interestelar en el flujo medido de una estrella. A medida que el flujo atraviesa nuestra galaxia, procesos de *scattering* van opacando la luz. Este fenómeno se puede tener en cuenta añadiendo el término A al final de la ley de Pogson¹³:

¹³https://es.wikipedia.org/wiki/Magnitud_aparente

$$m - M = 5 \log_{10} \left(\frac{d}{10} \right) + A \quad (7)$$

Donde d está en pársecs.

3.2.4. Distancia

La distancia está incorporada en el programa como *módulo de distancia* (dm), es decir, el déficit de magnitud observado en las estrellas debido a su lejanía. Es fácil extraer la distancia a partir de dm , utilizando de nuevo la ley de Pogson¹⁴:

$$dm = m - M = 5 \log_{10} \left(\frac{d}{10} \right) + A \quad (8)$$

Donde d está de nuevo en pársecs y la extinción A es nula porque estamos calculando únicamente los efectos de la distancia. Esto nos deja:

$$d = 10^{dm/5+1} \quad (9)$$

3.3. Isocronas

El software utilizado en este trabajo para ajustar las poblaciones observadas por Gaia a curvas isocronas teóricas es ASteCa (Perren, G. I., Vázquez, R. A. y Piatti, A. E. 2015)¹⁵ (Automated Stellar Cluster Analysis), una librería de Python capaz de estimar la edad, metalicidad, extinción, y distancia de un cúmulo estelar a partir de las magnitudes aparentes e índices de color de sus estrellas. A continuación se describe brevemente el proceso seguido en este trabajo para obtener los resultados finales.

En primer lugar se importó dentro de un *notebook* de *Jupyter*¹⁶ todas las tablas con las magnitudes y colores de los cúmulos. A continuación se importaron distintas curvas isocronas teóricas para un gran rango de edades y metalicidades, concretamente las de PARSEC (Bressan et al. 2012), BASTI (Hidalgo et al. 2018), y MIST (Dotter 2016) (Choi et al. 2016) (Paxton et al. 2011).

Las curvas de MIST ofrecen la posibilidad de incluir los efectos de la rotación de las estrellas respecto a su propio eje. Las curvas de BASTI permiten incluir procesos de *overshooting* (ensanchamiento de las capas convectivas debido a la intrusión de material convectivo en capas radiativas), pérdida de masa (expulsión de material desde la superficie debido a la actividad atmosférica), y difusión (movimiento a nivel atómico de distintas especies químicas).

3.4. Ajuste estadístico

A partir de los datos de Gaia y las isocronas, ASteCA produce una población estelar sintética que reproduzca la forma de ambas. Dicha población puede ser generada con ciertos parámetros fijos impuestos de antemano. En este trabajo se eligió fijar la abundancia de binarias en la población, y el parámetro de extinción $R(V)$.

En primer lugar, la cantidad de binarias viene dada en ASteCA¹⁷ por la fórmula descrita en (Offner et al. 2023):

$$P_b(m_1) = \alpha + \beta \times \frac{m_1}{(1.4 + m_1)} \quad (10)$$

¹⁴https://es.wikipedia.org/wiki/Magnitud_aparente

¹⁵Agradecimientos a Perren, G. I., el autor de ASteCa, por su ayuda a la hora de configurar el programa.

¹⁶<https://jupyter.org/>

¹⁷<https://github.com/asteca/ASteCA/blob/main/docs/tutorials/quickstart.ipynb>

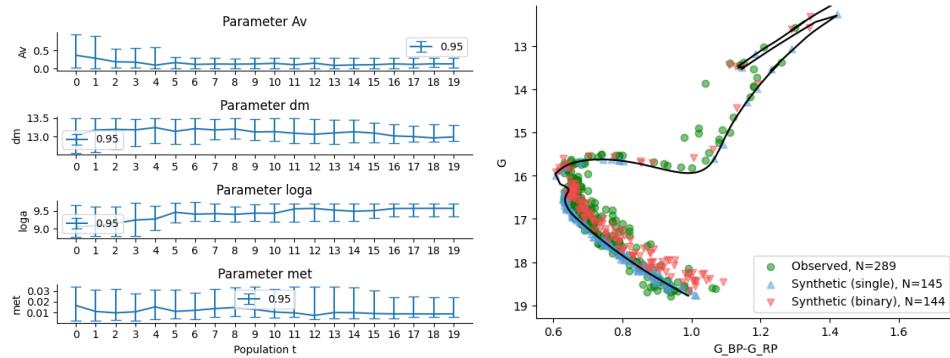
Donde P_b es la probabilidad de que una estrella de masa m_1 sea binaria, y los parámetros $\alpha = 0,09$ y $\beta = 0,94$ tienen los valores recomendados por el autor de (Offner et al. 2023). Las observaciones actuales apuntan a que la gran mayoría de estrellas se forman en sistemas binarios, siendo esto más probable para estrellas más masivas. Como se verá más adelante, eso permite modelar de forma bastante precisa el grosor de la secuencia principal en los cúmulos, que está lejos de ser una línea debido a la presencia de binarias no resueltas en la población. Como se puede apreciar en la Figura 4, dichas estrellas binarias aparecen en regiones más brillantes que las estrellas no binarias, debido a que se está observando en conjunto la suma de las luminosidades de 2 estrellas distintas.

En segundo lugar, se ha impuesto un valor de $R(V) = 3,1$; válido para la mayor parte de regiones del cielo en nuestra galaxia (Schultz y Wiemer 1975). $R(V)$ es un parámetro astrofísico que relaciona la extinción con el enrojecimiento de la luz tras su paso por el medio interestelar. De forma simplificada, los procesos de *scattering* que experimentan los fotones de una estrella al pasar por nubes de gas o polvo afectan en mayor medida a longitudes de onda menores, potenciando los valores en bandas fotométricas más rojas, y dando una apariencia más rojiza al espectro estelar. $R(V)$ mide este fenómeno mediante el cociente entre la extinción total en la banda fotométrica V ($A(V)$) y la diferencia de extinción entre las bandas B y V:

$$R(V) = \frac{A(V)}{E(B - V)} \quad (11)$$

$$E(B - V) = A(B) - A(V) \quad (12)$$

Existe una degeneración entre los efectos de la metalicidad, la extinción, y la distancia. Cambios en cualquiera de estos 3 parámetros pueden desplazar las estrellas de forma similar en el diagrama de Hertzsprung-Russell, es decir, varias combinaciones de metalicidad, extinción, y distancia son capaces de reproducir exactamente la misma magnitud aparente y color de una estrella dada. Sin embargo, ASteCA utiliza la librería de Python pyABC (Schälte et al. 2022) para ajustar mediante estadística bayesiana los parámetros libres previamente mencionados, y ofrece estimaciones para el conjunto de valores que mejor reproduce las medidas experimentales.



(a) Cotas de los parámetros ajustados en función del número de iteraciones. (b) Datos de Gaia con curva isocrona y población sintética superpuestas.

Figura 4: Ejemplos de outputs de ASteCA.

La exactitud de las estimaciones depende de la calidad de las mediciones observacionales y de las isocronas teóricas. Es importante una determinación certera de la pertenencia, con tal de no forzar al programa a ajustar estrellas en posiciones imposibles para una población simple isocrona. A su vez, es esencial disponer de curvas isocronas teóricas que puedan reproducir medidas reales

de cúmulos abiertos. En este trabajo se han usado una variedad de ellas para determinar en qué casos concretos es preferible usar unas sobre otras.

Un método directo para ver la calidad de los ajustes de ASteCA es ver la precisión con la que es capaz de determinar la distancia del cúmulo. Para los cúmulos jóvenes dicha precisión fue del $\sim 15\%$, para los cúmulos de edad intermedia del $\sim 5\%$, y para los cúmulos de edad avanzada $\sim 10\%$. Las tablas completas con los errores se pueden ver en este enlace¹⁸.

4. Resultados y discusión

4.1. Extinción, distancia, edad y metalicidad a partir de ajustes de isocronas con ASteCA

4.1.1. Cúmulos jóvenes NGC 6705 y NGC 6281

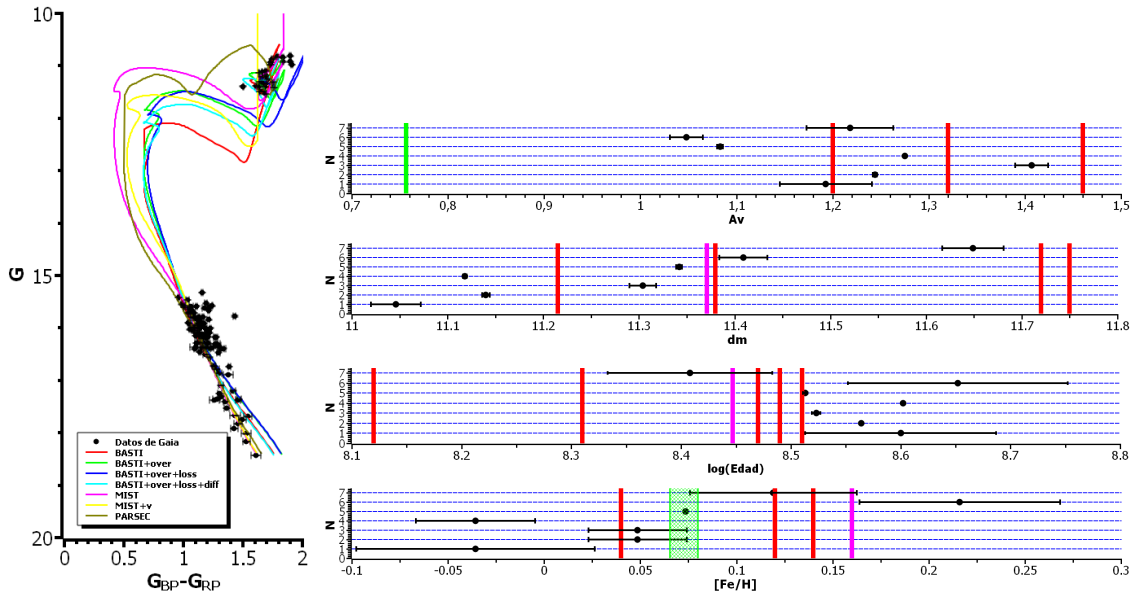


Figura 5: Resultados de los ajustes para NGC 6705.

¹⁸<https://drive.google.com/drive/folders/13fJNp2VbKq-cozvJZBTJBWkdmA4LfIZt?usp=sharing>

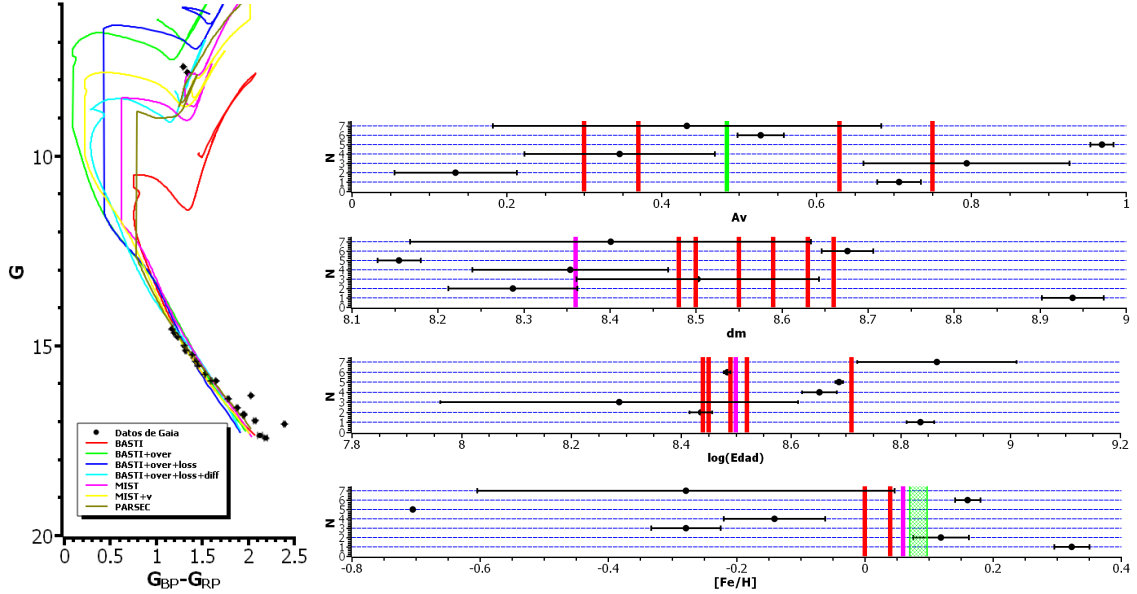


Figura 6: Resultados de los ajustes para NGC 6281.

En todas las gráficas de esta sección, las medidas de ASteCA están en negro. En las gráficas de los parámetros de los cúmulos, N (el eje Y) denota el tipo de isocrona utilizado: $N=1$: BASTI, $N=2$: BASTI+over, $N=3$: BASTI+over+loss, $N=4$: BASTI+over+loss+diff, $N=5$: MIST, $N=6$: MIST+v, $N=7$: PARSEC. Los valores de la literatura están en rojo. Los valores de (Gutiérrez Albarrán et al. 2024) están en magenta. La media aritmética de las medidas de Gaia está señalada en verde.

Los cúmulos jóvenes (Figuras 5 y 6) demostraron ser muy difíciles de ajustar con precisión. En la sección anterior se comentó cómo la cota de error del ajuste de la distancia para NGC 6705 y NGC 6281 es mucho mayor que la de los cúmulos de edades intermedias y viejos. Es probable que esto se deba a la ausencia de estrellas en el punto de giro de la secuencia principal, y a la escasez de estrellas en la rama de las gigantes, regiones críticas para un ajuste exacto.

En cúmulos de en torno a 10^8 años, como estos, las estrellas en el punto de giro son muy masivas, lo cual lleva asociado problemas de pérdida de masa (Kippenhahn, Weigert y Weiss 2012c), actividad atmosférica, y en general una alta volatilidad, que dificulta mucho su identificación como integrantes de un cúmulo. Su exclusión del ajuste estadístico limita la eficacia de las isocronas como método para calcular los parámetros de cúmulos demasiado jóvenes.

Como se puede observar en las gráficas, las isocronas ajustadas no parecen converger a una única forma, especialmente para NGC 6281. Los valores de A_v , dm y la edad no difieren excesivamente de la literatura, pero están lejos de ser precisos. La metalicidad, concretamente la de NGC 6281, es muy poco fiable, y cubre prácticamente todo el rango teórico posible, lo cual indica un ajuste inadecuado.

Si comparamos los resultados de los distintos tipos de isocronas se observa que PARSEC ofrece resultados con una precisión excepcionalmente baja. A su vez, tanto BASTI+over como BASTI+over+loss se acercan con cierta precisión y exactitud a los valores de la literatura, ofreciendo para NGC 6705 resultados para la metalicidad compatibles con la media medida por Gaia-ESO. Sin embargo, es difícil concluir si esto se debe realmente a la fiabilidad de las isocronas, o a una exactitud fortuita para este cúmulo concreto. El estudio de más cúmulos jóvenes sería necesario para poder concluir si realmente dichas isocronas son más precisas.

4.1.2. Cúmulos de edades intermedias NGC 2355 y NGC 6802

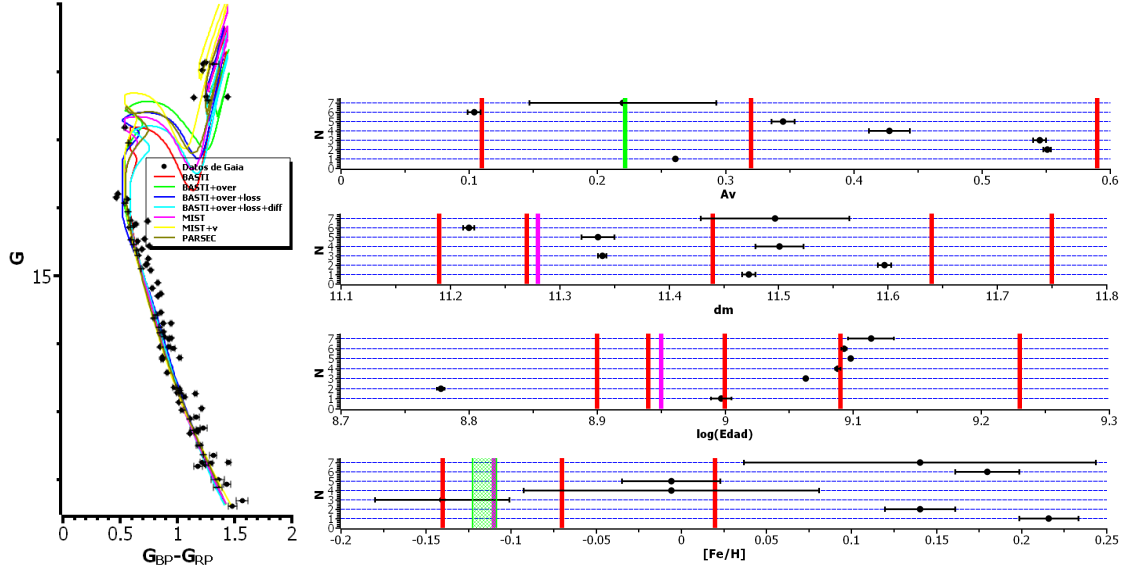


Figura 7: Resultados de los ajustes para NGC 2355.

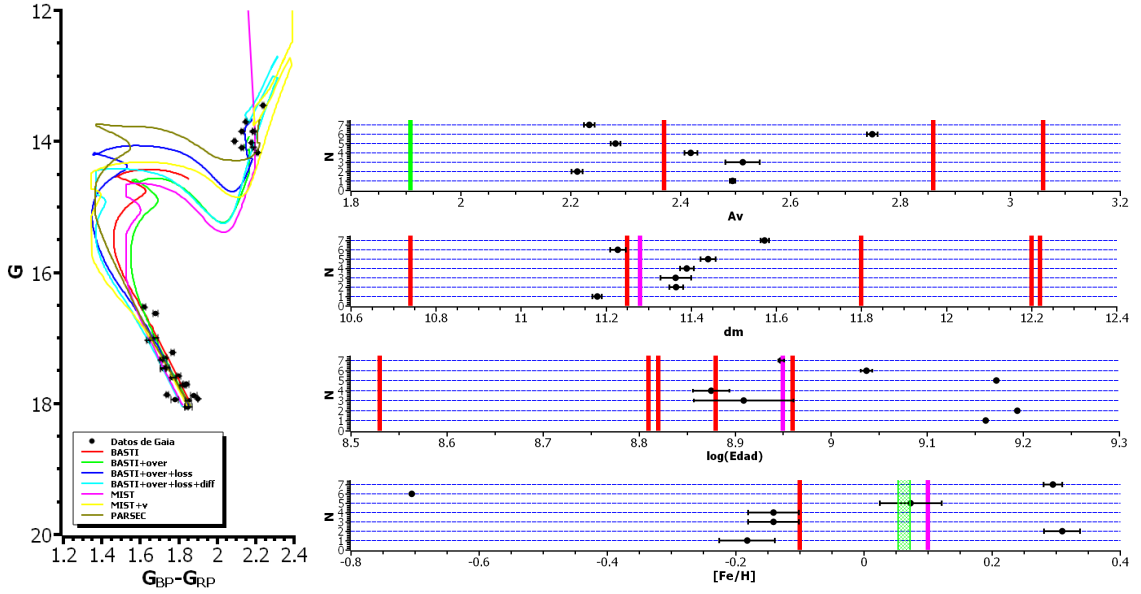


Figura 8: Resultados de los ajustes para NGC 6802.

El ajuste de cúmulos de edad intermedia (Figuras 7 y 8) resultó ser mucho más sencillo y preciso que el de cúmulos jóvenes. Especialmente para NGC 2355, que posee una amplia gama de estrellas en el punto de giro y en la rama de las gigantes rojas. De nuevo, el método no presenta dificultades a la hora de estimar A_v , dm y la edad, y todos los resultados son cercanos a los de la literatura. Sin embargo, la metalicidad cubre una cota de valores muy elevada, y es difícil concluir qué isocronas ofrecen mejores resultados.

4.1.3. Cúmulos viejos M67 y NGC 2243

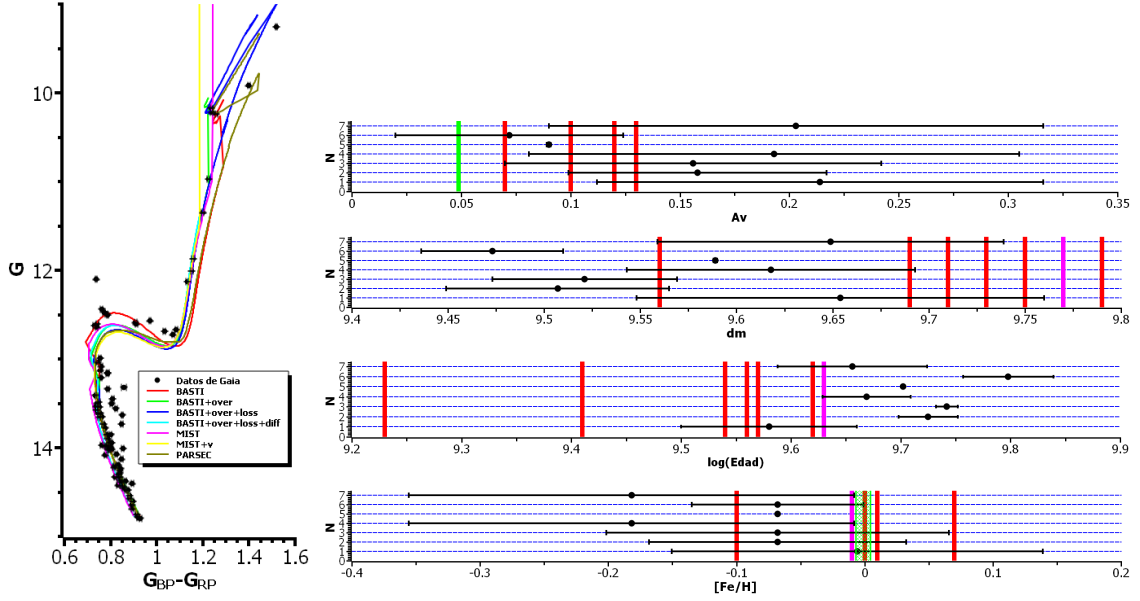


Figura 9: Resultados de los ajustes para M67.

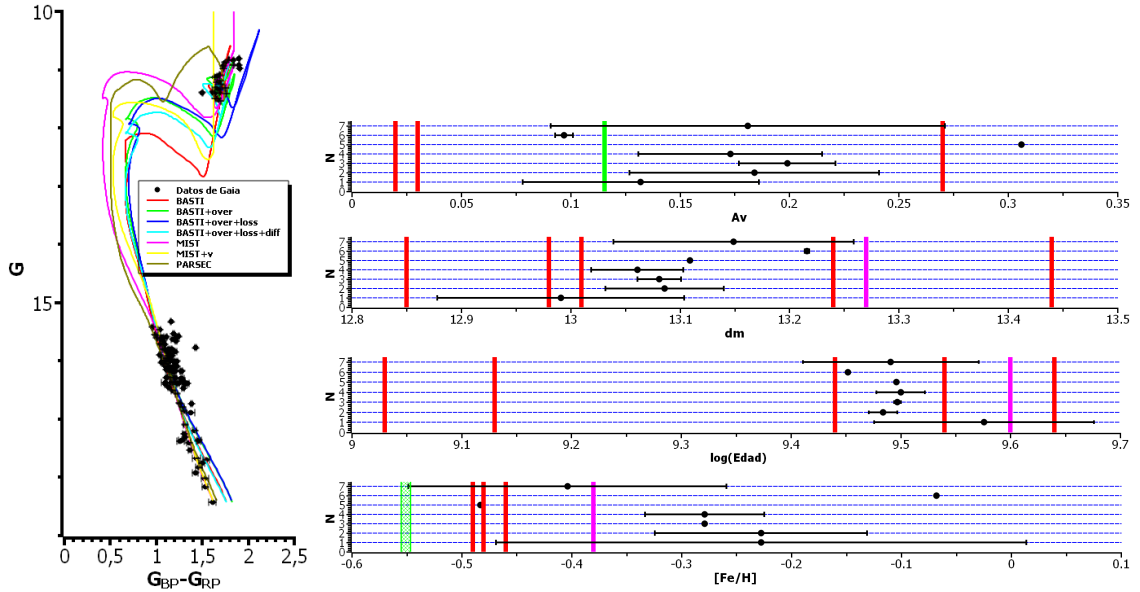


Figura 10: Resultados de los ajustes para NGC 2243.

Finalmente, el ajuste de cúmulos envejecidos (Figuras 9 y 10) fue el más preciso y exacto de todos. La abundancia de estrellas, y su distribución uniforme por todo el CMD garantizó resultados mejores que los de cúmulos jóvenes e intermedios. No solo se estimó correctamente los valores de A_v , dm y la edad, sino también los de la metalicidad, y se pudo concluir con certeza si esta estaba por encima o por debajo de la metalicidad solar.

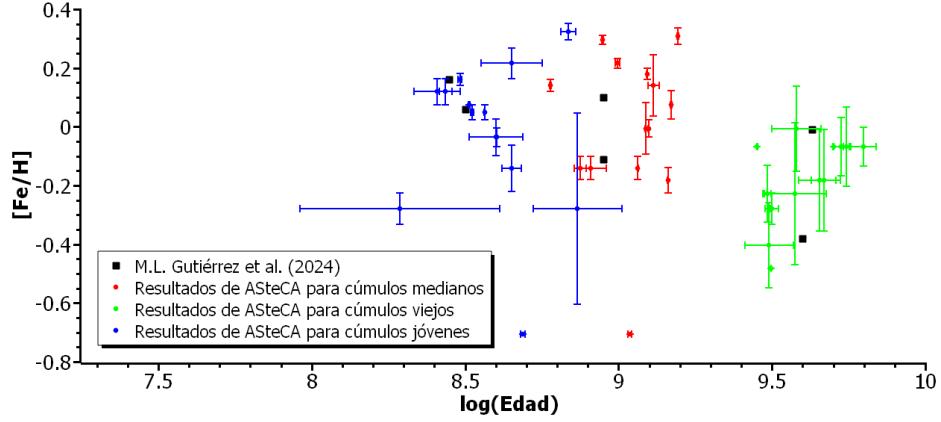


Figura 11: Comparación entre los distintos ajustes de ASteCA y (Gutiérrez Albarrán et al. 2024).

En la Figura 11 se aprecia como los resultados mejoran con la edad del cúmulo estudiado. A pesar de tener más precisión, el ajuste de los cúmulos de edades intermedias resultó ser menos exacto que el de los cúmulos envejecidos.

Un estudio superficial parece apuntar a que la incorporación de los efectos de la rotación en las isocronas MIST+v no ofrece ninguna ventaja respecto a MIST. Por otro lado, BASTI+over y BASTI+over+loss sí parecen mejorar los resultados respecto a BASTI, lo que parece apuntar a que los efectos del *overshooting* y la pérdida de masa tienen un papel muy relevante en la evolución estelar. Sin embargo, BASTI+over+loss+diff no mejora los ajustes. PARSEC, a pesar de ser el modelo más sencillo en cuanto a la inclusión de factores adicionales, ofrece resultados sistemáticamente fiables, y consigue amoldarse a la forma de una gran variedad de cúmulos.

Es difícil sacar conclusiones de las distintas isocronas a partir de tan pocos ejemplos. La muestra de estrellas y cúmulos es demasiado escasa como para afirmar que las relaciones expuestas anteriormente no se deben a fluctuaciones aleatorias. Un análisis más concienzudo, con más cúmulos, datos de mayor precisión, y/o tablas de pertenencia actualizadas, podría desmentir dichas afirmaciones.

4.2. Magnitudes absolutas a partir de datos de Gaia

Con tal de ilustrar los efectos de la edad y la metalicidad en las poblaciones estelares, se han obtenido a partir de los datos de Gaia DR3 las magnitudes absolutas e índices de color verdaderos:

$$M_G = m_G - 5 \log(d/10) - A_G \quad (13)$$

$$(BP - RP)_0 = (BP - RP) - E(BP - RP) \quad (14)$$

Donde d es la distancia en pársecs obtenida a partir del paralaje, y los parámetros A_G y $E(BP - RP)$ son las estimaciones de Gaia de la extinción y el enrojecimiento respectivamente, obtenidas a partir de las medidas fotométricas. Algunas estrellas no tenían medida de la extinción asociada, y se les han aplicado los valores medios del resto del cúmulo.

Junto con las estrellas corregidas se han representado las isocronas BASTI+over mejor ajustadas a cada cúmulo, desplazadas en el diagrama acorde con el valor medio de d , A_G y $E(BP - RP)$ para cada grupo estelar.

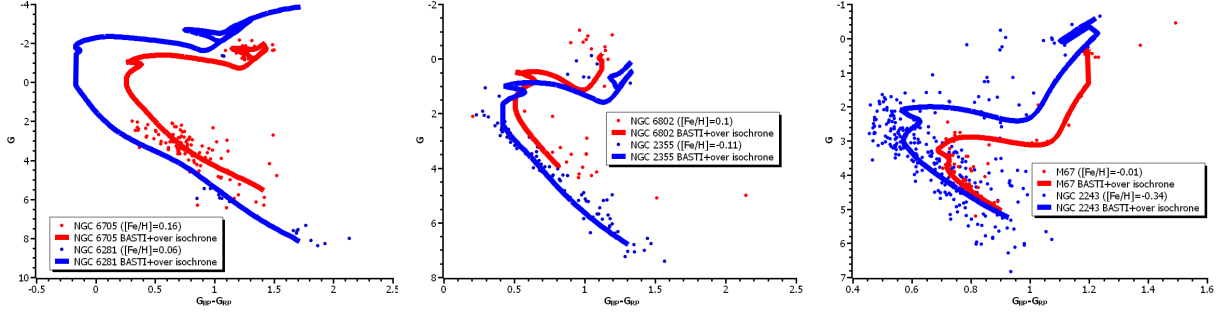


Figura 12: CMD comparando los cúmulos jóvenes NGC 6705 y NGC 6281 (panel izquierdo), los cúmulos de edades intermedias NGC 6802 y NGC 2355 (panel central), y los cúmulos viejos NGC 2243 y M67 (panel derecho). Metalicidades de (Gutiérrez Albarrán et al. 2024).

Como se ha comentado en secciones anteriores, la teoría dicta que un aumento en la metalicidad en una estrella lleva asociado un aumento en el índice de color, y una disminución en el brillo. En la Figura 12 se aprecia que en todas las parejas de cúmulos el integrante más metálico (pintado en rojo) está más desplazado a la derecha que su compañero.

La rama de la secuencia principal en los cúmulos más metálicos parecen estar desplazadas hacia arriba a la derecha, en luminosidades mayores. Sin embargo, individualmente, las estrellas de misma masa se desplazan abajo a la derecha al incrementar su metalicidad, hacia luminosidades menores. Es el efecto completo del cúmulo el que provoca que, para una misma temperatura global pero mayor metalicidad, la línea isocrona quede por encima de la otra.

Existe una discrepancia importante entre la teoría y la práctica en la pareja de cúmulos de edad intermedia (NGC 6802 y NGC 2355). Es posible que se deba a una estimación de la edad inexacta. En (Gutiérrez Albarrán et al. 2024) se les da la misma edad, pero en otros valores de la literatura existe una mayor discrepancia. Haciendo la media de los valores de referencia (Sección 3.1.1.) obtenemos un valor de $\log(Edad) = 9,02$ para NGC 2355 y $\log(Edad) = 8,83$ para NGC 6802. Es decir, a los efectos de la metalicidad hay que añadirles los de la edad. Al ser NGC 2355 bastante más viejo que NGC 6802, su punto de giro de la secuencia principal está desplazado abajo a la derecha, solapándose con el de su compañero.

5. Conclusiones

Como se ha mostrado en las secciones anteriores, se realizaron con éxito los objetivos de este trabajo: una introducción al método de determinación de parámetros estelares a partir del ajuste de datos de Gaia a isocronas teóricas; un estudio preliminar de las distintas isocronas disponibles en la actualidad; y una comparación entre los efectos observacionales de la edad y la metalicidad en las estrellas.

Este método posee una exactitud directamente ligada a la completitud de los modelos estelares teóricos modernos, que comúnmente no incluyen los efectos de la rotación, interacción entre binarias, campos magnéticos, etc. Por otro lado, no se pudo obtener resultados con una gran precisión, especialmente en los cúmulos jóvenes de ~ 100 millones de años, debido a la ausencia de estrellas miembro en fases evolutivas críticas (como el punto de giro o la rama de las gigantes). A pesar de ello, se pudo ajustar de forma aproximada la extinción, la distancia, la edad y la metalicidad de los 6 cúmulos, siendo dichos resultados relativamente cercanos a los de la literatura. La precisión y exactitud de los ajustes mejoró con la edad y la cantidad de estrellas, siendo los cúmulos viejos muy poblados los candidatos óptimos para este método.

Una forma sencilla de mejorar considerablemente los resultados es por tanto una mejor determinación de pertenencia de las estrellas de los cúmulos. Tal y como han realizado algunos investigadores citados en los valores de referencia, nuevas técnicas con redes neuronales pueden ayudar a identificar estrellas previamente descartadas. A su vez, catálogos más completos y precisos aportarían una mejor base sobre la que construir las tablas de pertenencia. Gaia publicará en los próximos años sus siguientes catálogos, DR4 y DR5¹⁹, aún más completos y precisos que DR3. Más misiones como Gaia son críticas para el progreso de estas técnicas.

Por otro lado, la comparación entre las distintas isocronas utilizadas en este trabajo demostró ser relativamente inconclusa, pero se pudo extrapolar que PARSEC ofrece resultados sistemáticamente exactos, pero de menor precisión; mientras que BASTI+over y BASTI+over+loss, que incluyen los efectos del *overshooting* y la pérdida de masa, ofrecen resultados más exactos y precisos que el resto de modelos.

Finalmente, se pudo observar con claridad cómo el punto de giro de la secuencia principal se desplaza por el CMD por los efectos de la edad del cúmulo. También se observó cómo los cúmulos más metálicos están desplazados hacia luminosidades menores y colores más rojizos.

Referencias

- El-Badry, Kareem et al. (mayo de 2023). “A red giant orbiting a black hole”. En: 521.3, págs. 4323-4348. DOI: 10.1093/mnras/stad799. arXiv: 2302.07880 [astro-ph.SR].
- Bossini, D. et al. (mar. de 2019). “Age determination for 269 Gaia DR2 open clusters”. En: 623, A108, A108. DOI: 10.1051/0004-6361/201834693. arXiv: 1901.04733 [astro-ph.SR].
- Bressan, Alessandro et al. (nov. de 2012). “PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PADova and TRIeste Stellar Evolution Code”. En: 427.1, págs. 127-145. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x. arXiv: 1208.4498 [astro-ph.SR].
- Cantat-Gaudin, T. et al. (ago. de 2020). “Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters”. En: 640, A1, A1. DOI: 10.1051/0004-6361/202038192. arXiv: 2004.07274 [astro-ph.GA].
- Caplan, Matthew E., Earl P. Bellinger y Andrew D. Santarelli (2024). *Is there a black hole in the center of the Sun?* arXiv: 2312.07647 [astro-ph.SR].
- Choi, Jieun et al. (jun. de 2016). “Mesa Isochrones and Stellar Tracks (MIST). I. Solar-scaled Models”. En: 823.2, 102, pág. 102. DOI: 10.3847/0004-637X/823/2/102. arXiv: 1604.08592 [astro-ph.SR].
- Dias, W. S. et al. (jun. de 2021). “Updated parameters of 1743 open clusters based on Gaia DR2”. En: 504.1, págs. 356-371. DOI: 10.1093/mnras/stab770. arXiv: 2103.12829 [astro-ph.SR].
- Donor, John et al. (mayo de 2020). “The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping Survey. IV. Abundances for 128 Open Clusters Using SDSS/APOGEE DR16”. En: 159.5, 199, pág. 199. DOI: 10.3847/1538-3881/ab77bc. arXiv: 2002.08980 [astro-ph.GA].
- Dotter, Aaron (ene. de 2016). “MESA Isochrones and Stellar Tracks (MIST) 0: Methods for the Construction of Stellar Isochrones”. En: 222.1, 8, pág. 8. DOI: 10.3847/0067-0049/222/1/8. arXiv: 1601.05144 [astro-ph.SR].
- Gaia Collaboration et al. (nov. de 2016). “The Gaia mission”. En: 595, A1, A1. DOI: 10.1051/0004-6361/201629272. arXiv: 1609.04153 [astro-ph.IM].
- Gavras, Panagiotis et al. (jun. de 2023). “Gaia Data Release 3. Cross-match of Gaia sources with variable objects from the literature”. En: 674, A22, A22. DOI: 10.1051/0004-6361/202244367. arXiv: 2207.01946 [astro-ph.IM].

¹⁹<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/release>

- Geller, Aaron M. et al. (mayo de 2017). “On the Origin of Sub-subgiant Stars. I. Demographics”. En: *The Astrophysical Journal* 840.2, pág. 66. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.3847/1538-4357/aa6af3. URL: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aa6af3>.
- Gilmore, G. et al. (mar. de 2012). “The Gaia-ESO Public Spectroscopic Survey”. En: *The Messenger* 147, págs. 25-31.
- Gutiérrez Albarrán, M. L. et al. (mayo de 2024). “The Gaia-ESO Survey: Calibrating the lithium-age relation with open clusters and associations. II. Expanded cluster sample and final membership selection”. En: 685, A83, A83. DOI: 10.1051/0004-6361/202348438. arXiv: 2404.08859 [astro-ph.SR].
- He, Zhihong et al. (sep. de 2022). “A Blind All-sky Search for Star Clusters in Gaia EDR3: 886 Clusters within 1.2 kpc of the Sun”. En: 262.1, 7, pág. 7. DOI: 10.3847/1538-4365/ac7c17. arXiv: 2206.12170 [astro-ph.GA].
- Hidalgo, Sebastian L. et al. (abr. de 2018). “The Updated BaSTI Stellar Evolution Models and Isochrones. I. Solar-scaled Calculations”. En: 856.2, 125, pág. 125. DOI: 10.3847/1538-4357/aab158. arXiv: 1802.07319 [astro-ph.GA].
- Hunt, Emily L. y Sabine Reffert (mayo de 2023). “Improving the open cluster census. II. An all-sky cluster catalogue with Gaia DR3”. En: 673, A114, A114. DOI: 10.1051/0004-6361/202346285. arXiv: 2303.13424 [astro-ph.GA].
- Jeans, James Hopwood y George Howard Darwin (1902). “I. The stability of a spherical nebula”. En: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 199.312-320, págs. 1-53. DOI: 10.1098/rsta.1902.0012. eprint: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.1902.0012>. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.1902.0012>.
- Kharchenko, N. V. et al. (jul. de 2012). “Global survey of star clusters in the Milky Way. I. The pipeline and fundamental parameters in the second quadrant”. En: 543, A156, A156. DOI: 10.1051/0004-6361/201118708. arXiv: 1207.4001 [astro-ph.GA].
- Kippenhahn, Rudolf, Alfred Weigert y Achim Weiss (2012a). “Evolution on the Main Sequence”. En: *Stellar Structure and Evolution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, págs. 343-363. ISBN: 978-3-642-30304-3. DOI: 10.1007/978-3-642-30304-3_30. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3_30.
- (2012b). “Evolution Through Helium Burning: Low-Mass Stars”. En: *Stellar Structure and Evolution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, págs. 391-414. ISBN: 978-3-642-30304-3. DOI: 10.1007/978-3-642-30304-3_33. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3_33.
- (2012c). “Mass Loss”. En: *Stellar Structure and Evolution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, págs. 83-85. ISBN: 978-3-642-30304-3. DOI: 10.1007/978-3-642-30304-3_9. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3_9.
- (2012d). “Opacity”. En: *Stellar Structure and Evolution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, págs. 163-174. ISBN: 978-3-642-30304-3. DOI: 10.1007/978-3-642-30304-3_17. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3_17.
- (2012e). “Stability Against Local, Non-spherical Perturbations”. En: *Stellar Structure and Evolution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, págs. 47-60. ISBN: 978-3-642-30304-3. DOI: 10.1007/978-3-642-30304-3_6. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3_6.
- (2012f). “The Hayashi Line”. En: *Stellar Structure and Evolution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, págs. 271-282. ISBN: 978-3-642-30304-3. DOI: 10.1007/978-3-642-30304-3_24. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3_24.
- (2012g). “The Onset of Star Formation”. En: *Stellar Structure and Evolution*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, págs. 299-309. ISBN: 978-3-642-30304-3. DOI: 10.1007/978-3-642-30304-3_26. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3_26.

- Loktin, A. V. y M. E. Popova (jul. de 2017). “Updated version of the ‘homogeneous catalog of open cluster parameters’”. En: *Astrophysical Bulletin* 72.3, págs. 257-265. DOI: 10.1134/S1990341317030154.
- Majewski, Steven R. et al. (sep. de 2017). “The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)”. En: 154.3, 94, pág. 94. DOI: 10.3847/1538-3881/aa784d. arXiv: 1509.05420 [astro-ph.IM].
- Offner, S. S. R. et al. (jul. de 2023). “The Origin and Evolution of Multiple Star Systems”. En: *Protostars and Planets VII*. Ed. por S. Inutsuka et al. Vol. 534. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 275. DOI: 10.48550/arXiv.2203.10066. arXiv: 2203.10066 [astro-ph.SR].
- Paxton, Bill et al. (ene. de 2011). “Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA)”. En: 192.1, 3, pág. 3. DOI: 10.1088/0067-0049/192/1/3. arXiv: 1009.1622 [astro-ph.SR].
- Perets, Hagai B. y Daniel C. Fabrycky (jun. de 2009). “On the Triple Origin of Blue Stragglers”. En: 697.2, págs. 1048-1056. DOI: 10.1088/0004-637X/697/2/1048. arXiv: 0901.4328 [astro-ph.SR].
- Perren, G. I., Vázquez, R. A. y Piatti, A. E. (abr. de 2015). “ASteCA: Automated Stellar Cluster Analysis”. En: *A&A* 576, A6. DOI: 10.1051/0004-6361/201424946. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201424946>.
- Schälte, Yannik et al. (2022). “pyABC: Efficient and robust easy-to-use approximate Bayesian computation”. En: *Journal of Open Source Software* 7.74, pág. 4304. DOI: 10.21105/joss.04304. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.04304>.
- Schultz, G. V. y W. Wiemer (sep. de 1975). “Interstellar reddening and IR-excesses of O and B stars.” En: 43, págs. 133-139.
- Tarricq, Y. et al. (mar. de 2022). “Structural parameters of 389 local open clusters”. En: 659, A59, A59. DOI: 10.1051/0004-6361/202142186. arXiv: 2111.05291 [astro-ph.GA].
- Taylor, M. B. (dic. de 2005). “TOPCAT & STIL: Starlink Table/VOTable Processing Software”. En: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*. Ed. por P. Shopbell, M. Britton y R. Ebert. Vol. 347. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 29.
- Tremblay, Pier-Emmanuel et al. (feb. de 2024). “The Gaia white dwarf revolution”. En: *arXiv e-prints*, arXiv:2402.14960, arXiv:2402.14960. DOI: 10.48550/arXiv.2402.14960. arXiv: 2402.14960 [astro-ph.SR].
- von Hippel, Ted et al. (jul. de 2006). “Inverting Color-Magnitude Diagrams to Access Precise Star Cluster Parameters: A Bayesian Approach”. En: 645.2, págs. 1436-1447. DOI: 10.1086/504369. arXiv: astro-ph/0603493 [astro-ph].
- Zhao, G., H. M. Qiu y Shude Mao (abr. de 2001). “High-Resolution Spectroscopic Observations of Hipparcos Red Clump Giants: Metallicity and Mass Determinations”. En: 551.1, págs. L85-L88. DOI: 10.1086/319832.