

# Estudio espectrofotométrico de cuatro cúmulos abiertos de características poco conocidas

F.O. Simondi-Romero<sup>1,2</sup>, A.V. Ahumada<sup>2,3</sup>, J.J. Clariá<sup>2,3</sup> & M.A. Oddone<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina*

<sup>2</sup> *Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina*

<sup>3</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

Received: 09 February 2024 / Accepted: 13 May 2024

©The Authors 2024

**Resumen** / A partir de datos *Gaia* y el ajuste de isócronas teóricas de última generación, se derivan enrojecimiento, distancia, edad y metalicidad para cuatro cúmulos abiertos de la Vía Láctea de características poco conocidas, a saber: ESO 559-SC02, Ruprecht 15, Ruprecht 38 y Teutsch 65. Estos parámetros fueron obtenidos no sólo a partir de diagramas color-magnitud construidos usando datos del catálogo *Gaia*, sino también utilizando espectros integrados obtenidos en el CASLEO (Argentina). Como segundo resultado, usando movimientos propios, distancias y velocidades radiales, se determina por primera vez la órbita de ESO 559-SC02.

**Abstract** / Using *Gaia* data and the fitting of most recent theoretical isochrones, reddening, distance, age and metallicity are derived for four Milky Way's open clusters of poorly known characteristics, namely: ESO 559-SC02, Ruprecht 15, Ruprecht 38 and Teutsch 65. These parameters were obtained both from color-magnitude diagrams constructed using data from the *Gaia* catalog and also using integrated spectra obtained at CASLEO (Argentina). As a second result, based on proper motions, distances and radial velocities, the orbit of the open cluster ESO 559-SC02 is determined for the first time.

*Keywords* / open clusters and associations: general — techniques: photometric — techniques: spectroscopic

## 1. Introducción

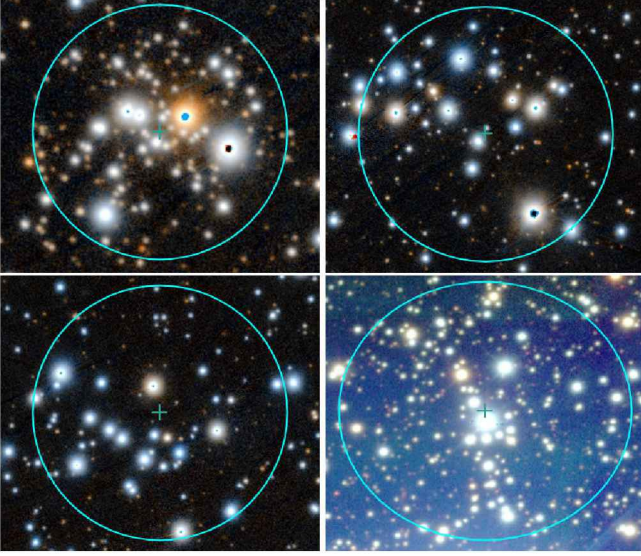
Los cúmulos estelares (CEs) pueden considerarse bloques primordiales en la evolución galáctica, ya que sus estrellas se formaron prácticamente en la misma época y con la composición química presente en la nube originaria (Janes, 2000). Esto permite, en general, comparar los CEs con modelos teóricos de poblaciones estelares simples, ya que posibilita estudiar y modelar los procesos de evolución estelar (Salaris & Cassisi, 2005). Conocer las propiedades físicas (v.g., edad, composición química), dinámicas (v.g., movimientos propios) y estructurales (v.g., distribución de masa) de un sistema de CEs como el de la Vía Láctea (VL), tanto como de aquéllos ubicados en otras galaxias a elevados *redshift* (Bradley et al., 2024), resulta fundamental para entender los procesos de formación y evolución de nuestra y otras galaxias (Greggio & Renzini, 2011). El estudio integrado de CEs en la era *Gaia*, es decir, el análisis conjunto de datos fotométricos, espectroscópicos y dinámicos de los mismos, supone el próximo escalón para arribar a una mejor comprensión de la formación y evolución de la VL y, por consiguiente, de otras galaxias similares.

En este trabajo se determinan enrojecimiento, distancia, edad y metalicidad para cuatro cúmulos abiertos (CAs) de la VL de características poco conocidas y, a partir de datos cinemáticos, se calcula la órbita de uno de ellos. En la Sec. 2 se presenta la muestra seleccionada, mientras que en la Sec. 3 se comentan los métodos empleados para determinar los parámetros astrofísicos.

En la Sec. 4 se presentan los resultados y en la Sec. 5 se examina la dinámica de uno de los cúmulos de la muestra. Finalmente, en la Sec. 6 se resumen las principales conclusiones de este trabajo.

## 2. Datos

La muestra de CAs seleccionada en este estudio (Fig. 1) se presenta en la Tabla 1, junto con las coordenadas ecuatoriales absolutas y galácticas y los diámetros angulares tomados de Archinal & Hynes (2003) o Kronberger et al. (2006). Para el presente trabajo se descargaron datos fotométricos y astrométricos del *Data Release 3* (Babusiaux et al., 2022) de la misión *Gaia* (*Gaia* Collaboration et al. 2016) en regiones circulares centradas en cada objeto, usando los radios angulares de los mismos. Los espectros integrados de los cuatro CAs seleccionados se obtuvieron con el telescopio “Jorge Sahade” de 2.15 m del CASLEO desplazando en declinación el telescopio a fin de coleccionar con la ranura ( $2.25' \times 5''$ ) del espectrógrafo toda la luz proveniente del CA (Ahumada et al. 2007). La reducción de los espectros y posterior calibración en flujo se llevó a cabo usando distintas tareas de IRAF.



**Fig. 1.** Imágenes de los cúmulos abiertos estudiados obtenidas de Aladin. *Panel sup. izq.:* ESO 559-SC02. *Panel sup. der.:* Ru 15. *Panel inf. izq.:* Ru 38. y *Panel inf. der.:* Teu 65. Los círculos celestes representan los diámetros angulares adaptados de cada objeto.

**Tabla 1.** Coordenadas galácticas, ecuatoriales absolutas y diámetro angular de los objetos de la muestra.

Objeto	l [°]	b [°]	$\alpha_{2000.0}$ [h m s]	$\delta_{2000.0}$ [° '"]	d [°]
ESO 559-SC02	232.5	-2.7	07 18 05.6	-18 35 42	1.2
Ruprecht 15	233.5	-2.9	07 19 31.7	-19 37 48	2.0
Ruprecht 38	237.6	+3.2	07 50 29.0	-20 11 06	2.0
Teutsch 65	266.2	-1.5	08 50 32.5	-46 29 47	2.1

### 3. Método

#### 3.1. Fotometría

Para cada objeto seleccionado se construyó un diagrama color-magnitud (DCM) siguiendo el proceso descrito en Baracchi et al. (2023), el cual consiste en seleccionar estrellas cuyos errores en magnitud fueran inferiores a 0.022 en el filtro G (Gaia Collaboration et al. 2018). Luego, se seleccionaron los posibles miembros de cada CA teniendo en cuenta los movimientos propios, la paralaje estelar y su error relativo de acuerdo al procedimiento descrito por Piccioni (2022). En este trabajo se realizó una segunda selección variando el diámetro angular de cada objeto de manera de incluir posibles miembros más alejados del centro. Finalmente, la muestra se refinó seleccionando sólo aquellas estrellas que presentaban un error en sus paralajes (positivas) menor al 30% (Luri et al. 2018). Para cada selección de estrellas, se construyó el correspondiente DCM ( $G - G_{RP}$ ,  $G$ ) de los filtros G y  $G_{RP}$  de Gaia y se ajustaron visualmente diferentes isócronas teóricas para el sistema fotométrico de Gaia, todas obtenidas del código PARSEC (Bressan et al. 2012) en su última versión (CMD 3.7\*). El mejor ajuste de la isócrona de una determinada edad y meta-

licidad permitió determinar con precisión razonable el exceso de color  $E[G - G_{RP}]$  y el módulo de distancia. Tanto para la manipulación de los datos como para la construcción de los DCM, se utilizó siempre el programa TOPCAT (*Tool for OPERations on Catalogues And Tables*, Taylor 2017).

#### 3.2. Espectroscopía integrada

La metodología aplicada para la determinación espectroscópica de enrojecimiento y edad consistió en medir anchos equivalentes de las líneas de Balmer para usarlos como primer indicador de edad y aplicar luego el “método de ajuste de *templates*”, utilizando el *software* FISA (Benítez-Llambay et al. 2012) descrito en trabajos anteriores (v.g., Clariá et al. 2017). En este proceso, se utilizaron las bases de *templates* de metalicidad solar de Piatti et al. (2002) y Ahumada et al. (2007). La elección final del *template* que mejor ajusta el espectro observado del cúmulo se realizó teniendo en cuenta el flujo residual calculado como  $(F_{\text{cúmulo}} - F_{\text{template}})/F_{\text{cúmulo}}$ , ya que de esta manera se tiene en cuenta el buen acuerdo logrado entre la profundidad de las líneas y la forma del continuo.

### 4. Análisis de datos

A continuación, por razones de espacio, se presenta el análisis detallado de dos CAs de la muestra: ESO 559-SC02 y Ruprecht 15, en tanto que los resultados derivados para toda la muestra se presentan en la Tabla 2.

#### 4.1. ESO 559-SC02

En la Fig. 2a se presenta el DCM de ESO 559-SC02 y las isócronas del mejor ajuste. En dicho diagrama se representan con círculos rojos todos los objetos dentro de la región observada, y aquellos que a partir de nuestro análisis serían miembros, se presentan como círculos negros. En rojo con borde negro se presentan los miembros proyectados dentro de la región observada, los que al ser tenidos en cuenta confieren mayor confianza a la determinación de los parámetros astrofísicos del objeto. El aporte de estas últimas al espectro integrado dependerá de su posición en el DCM. En la Fig. 2b se presenta en rojo el espectro integrado del cúmulo, en azul el *template* ajustado y en verde el flujo residual entre ambos espectros. Se han aplicado constantes para desplazar los mismos.

ESO 559-SC02 resulta ser un CA de  $2 \times 10^9$  años y metalicidad solar según su DCM, con  $E[G - G_{RP}] = 0.37$  y un módulo de distancia de 14.45 mag (7.8 kpc), en buen acuerdo con la distancia estadística de 8.0 kpc obtenida a partir de la astrometría de Gaia. Nótese la presencia en el DCM de una estrella gigante roja brillante ( $G = 12.9$  mag), la cual también aporta al espectro integrado. Si se relajan las condiciones de pertenencia, los círculos rojos en la región inferior del DCM que continúan la tendencia de la isócrona son posibles miembros del cúmulo, mientras que los círculos rojos en la región superior son claramente estrellas de pri-

\*[http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd\\_3.7](http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd_3.7)

mer plano. Estos últimos objetos afectan ligeramente la región azul del espectro elevando el flujo total, como se aprecia en el flujo residual. El espectro integrado de ESO 559-SC02 se ajusta mejor con el *template Ia* de  $10^9$  años y  $E[B - V] = 0.35$ .

Oddone et al. (2018) determinaron tentativamente una edad de  $(2 - 3) \times 10^9$  años para ESO 559-SC02, mientras que Bica et al. (2019) sólo reportan este objeto como un candidato a CA, sin determinar sus parámetros astrofísicos.

## 4.2. Ruprecht 15

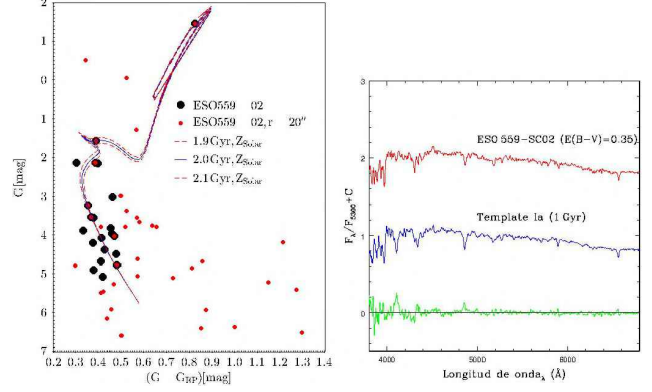
En las Figs. 3a y 3b se presentan el DCM de Ruprecht 15 y las isócronas del mejor ajuste y el espectro integrado y su mejor ajuste, respectivamente. Los colores corresponden de la misma manera que para ESO 559-SC02.

Ruprecht 15 es entonces un CA de  $7 \times 10^8$  años y metalicidad solar según su DCM, con  $E[G - G_{RP}] = 0.20$  y módulo de distancia 12.4 mag (3.0 kpc), mientras que la distancia estadística es 2.7 kpc. Puede apreciarse a partir del DCM que, entre las estrellas consideradas miembros, las dos más brillantes fueron observadas con aportes similares al espectro. Si se relajan las condiciones de pertenencia, los círculos rojos en la región inferior del DCM que continúan la tendencia de la isócrona son potenciales miembros, aunque por supuesto puede existir contaminación por estrellas del campo responsables de algunas diferencias en el ajuste del espectro integrado. El mejor ajuste del espectro observado se logra con el *template Yh* de  $5 \times 10^8$  años, adoptando  $E[B - V] = 0.31$ . Debe tenerse presente que las librerías de espectros *templates* son discretas en edad y que el template que continúa al antes mencionado corresponde a  $10^9$  años, con el cual no se logra un buen ajuste.

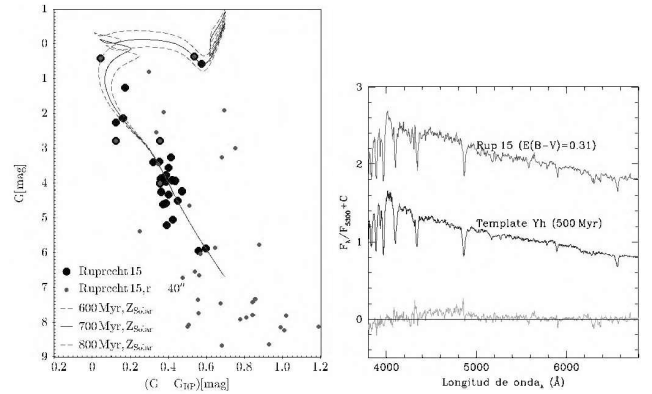
Usando datos del catálogo 2MASS (Skrutskie et al. 2006), Tadross (2012) deriva para este cúmulo  $E[B - V] = 0.65$ , un módulo de distancia de 11.9 mag y una edad de  $5 \times 10^8$  años, con abundancia solar. Kharchenko et al. (2013), por su parte, reportan  $E[B - V] = 0.31$ , un módulo de distancia de 12 mag y una edad de  $6 \times 10^8$  años, mientras que Piatti (2017) no lo considera un CA y Loktin & Popova (2017) derivan  $E[B - V] = 0.27$ , 12.68 mag y  $10^9$  años, respectivamente.

## 5. Dinámica

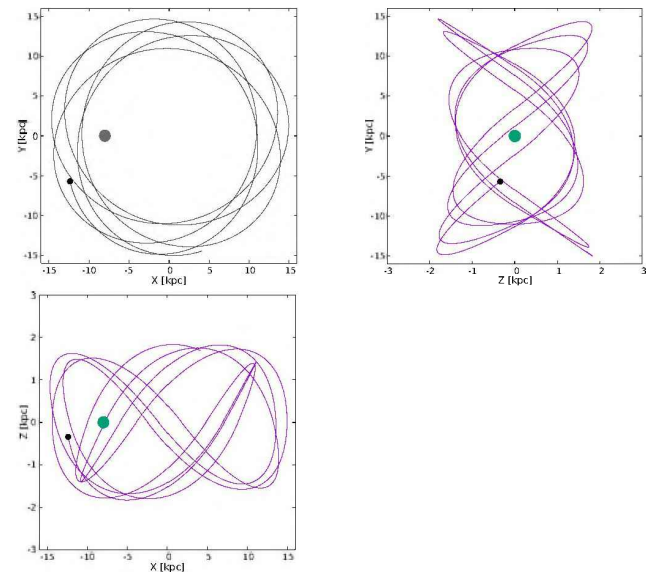
En las Figs. 4 y 5 se presentan proyecciones de la órbita de ESO 559-SC02 sobre distintos planos y la órbita completa del cúmulo en tres dimensiones, respectivamente, esta última obtenida a partir de los datos estadísticos determinados con TOPCAT, usando un potencial de Miyamoto & Nagai (1975) con parámetros de Allen & Santillan (1991). Si bien existen nuevos parámetros en la bibliografía, este análisis se encuentra en su etapa de prueba y espera poder ser ampliado en futuros trabajos.



**Fig. 2.** Ajustes realizados sobre ESO 559-SC02. Panel izq.: DCM con las isócronas propuestas como los mejores ajustes; Panel der.: espectro integrado corregido por enrojecimiento en rojo, *template Ia* en azul y flujo residual en verde.



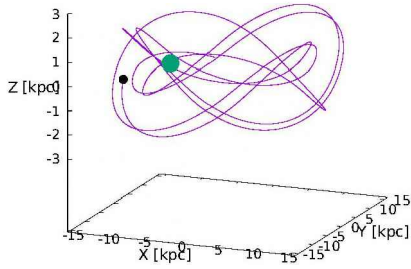
**Fig. 3.** Ajustes realizados sobre Ruprecht 15. Panel izq.: DCM con las isócronas propuestas como los mejores ajustes; Panel der.: espectro integrado corregido por enrojecimiento en rojo, *template Yh* en azul y flujo residual en verde.



**Fig. 4.** Proyecciones de la órbita de ESO 559-SC02 sobre diferentes planos en violeta. Los pequeños círculos negro y verde representan la posición actual del cúmulo y del Sol, respectivamente.

**Tabla 2.** Parámetros derivados para los CAs de este trabajo.

Objeto	Edad isócrona $\times 10^9$ años	Z isócrona	$E[G - G_{RP}]$	Módulo de distancia	Edad template $\times 10^9$ años	$E[B - V]$
ESO 559-SC02	$2.0 \pm 0.1$	$Z_{Solar}$	$0.37 \pm 0.02$	$14.45 \pm 0.02$	1	$0.35 \pm 0.02$
Ruprecht 15	$0.7 \pm 0.1$	$Z_{Solar}$	$0.20 \pm 0.02$	$12.40 \pm 0.02$	0.5	$0.31 \pm 0.02$
Ruprecht 38	$2 \pm 1$	$Z_{Solar}$	$0.13 \pm 0.02$	$12.68 \pm 0.02$	2	$0.00 \pm 0.02$
Teutsch 65	$1.2 \pm 0.2$	$Z_{Solar}$	$0.33 \pm 0.02$	$12.65 \pm 0.02$	0.4	$0.25 \pm 0.02$


**Fig. 5.** Órbita en tres dimensiones de ESO 559-SC02. Los pequeños círculos negro y verde representan la posición actual del cúmulo y del Sol, respectivamente.

## 6. Conclusiones

En la Tabla 2 se presentan los parámetros aquí determinados para los cuatro CAs seleccionados, de los cuales se desprenden las siguientes conclusiones.

- Se determinaron parámetros astrofísicos de cuatro CAs a partir de dos técnicas diferentes, espectroscopía y fotometría. Dado que en tres de los CAs analizadas las edades calculadas son similares, se concluye que ambas técnicas resultan complementarias. Es decir, con el espectro integrado puede analizarse el objeto en su conjunto, en especial cuando dicho objeto no puede resolverse en estrellas individuales. Teu65 es un CA particular, el cual su estudio será profundizado en trabajos futuros.
- En base al análisis astrométrico, fotométrico y espectroscópico del presente estudio es posible concluir que ESO 559-SC02 y Ruprecht 15 son CAs de aproximadamente  $2 \times 10^9$  años y  $7 \times 10^8$  años, respectivamente. Un análisis similar sobre Ruprecht 38 y Teutsch 65 permite derivar los resultados consignados en la Tabla 2.
- Si bien los parámetros determinados con datos *Gaia* para objetos relativamente cercanos son verdaderamente precisos, en la actualidad no resultan suficientes para obtener resultados científicos confiables en objetos astronómicos más distantes, tales como las Nubes de Magallanes. Por esta razón, sigue siendo recomendable la aplicación de la técnica de espectroscopía integrada para objetos extragalácticos.
- Finalmente, la mejor comprensión de los procesos a través de los cuales se formó la VL, y por ende otras

galaxias similares, reside en el estudio de los gradientes actuales de metalicidad radial y perpendicular al plano Galáctico y en los denominados paleogradientes (Piatti et al. 1995). Con este propósito, continuaremos determinando parámetros astrofísicos de CAs y utilizaremos los parámetros estadísticos calculados para integrar las órbitas de estos objetos y reconocer sus lugares de nacimiento para caracterizar la VL en metalicidad.

*Agradecimientos:* Based on data obtained at Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), operated under agreement between the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina and the National Universities of La Plata, Córdoba and San Juan.

## Referencias

- Ahumada A.V., Clariá J.J., Bica E., 2007, *A&A*, 473, 437  
 Allen C., Santillan A., 1991, *RMxAA*, 22, 255  
 Archinal B.A., Hynes S.J., 2003, *Star Clusters*, Willman-Bell, Inc.  
 Babusiaux C., et al., 2022, *Gaia DR3 documentation Chapter 2: Simulated data*  
 Baracchi M.A., et al., 2023, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía*, La Plata, Argentina, 64, 96  
 Benítez-Llambay A., Clariá J.J., Piatti A.E., 2012, *PASP*, 124, 173  
 Bica E., et al., 2019, *AJ*, 157, 12  
 Bradley L.D., et al., 2024, *arXiv e-prints*, arXiv:2404.10770  
 Bressan A., et al., 2012, *MNRAS*, 427, 127  
 Clariá J.J., et al., 2017, *NewA*, 56, 71  
 Gaia Collaboration, et al., 2016, *A&A*, 595, A1  
 Gaia Collaboration, et al., 2018, *A&A*, 616, A10  
 Greggio L., Renzini A., 2011, *Stellar Populations. A User Guide from Low to High Redshift, Series in Cosmology*, Wiley-VCH-Verlag  
 Janes K., 2000, P. Murdin (Ed.), *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, 1871  
 Kharchenko N.V., et al., 2013, *A&A*, 558, A53  
 Kronberger M., et al., 2006, *A&A*, 447, 921  
 Loktin A.V., Popova M.E., 2017, *Astrophysical Bulletin*, 72, 257  
 Luri X., et al., 2018, *A&A*, 616, A9  
 Miyamoto M., Nagai R., 1975, *PASJ*, 27, 533  
 Oddone M.A., et al., 2018, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía*, La Plata, Argentina, 60, 243  
 Piatti A.E., 2017, *MNRAS*, 466, 4960  
 Piatti A.E., Clariá J.J., Abadi M.G., 1995, *AJ*, 110, 2813  
 Piatti A.E., et al., 2002, *MNRAS*, 335, 233  
 Piccioni R., 2022, *ASP Conference Series*, vol. 533, 247  
 Salaris M., Cassisi S., 2005, *Evolution of Stars and Stellar Populations*, Wiley-VCH-Verlag  
 Skrutskie M.F., et al., 2006, *AJ*, 131, 1163  
 Tadross A.L., 2012, *RAA*, 12, 158  
 Taylor M., 2017, *arXiv e-prints*, arXiv:1707.02160