

Estudio espectroscópico de cúmulos estelares pertenecientes a la Nube Mayor de Magallanes - Parámetros astrofísicos

M.I. Tapia-Reina^{1,2,3}, A.V. Ahumada^{2,3} & F.O. Simondi-Romero^{1,2}

¹ Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

² Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Received: 09 February 2024 / Accepted: 07 July 2024

©The Authors 2024

Resumen / A partir de observaciones realizadas en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO, San Juan, Argentina), se presentan espectros integrados en la región del visible correspondientes a 9 cúmulos estelares (CE) pertenecientes a la Nube Mayor de Magallanes (NMM). Mediante diferentes métodos tales como: medición de anchos equivalentes, ajuste de espectros de referencia (*templates*) y síntesis espectral, se determinaron edad, enrojecimiento y metalicidad de cada CE. En cuanto a la abundancia metálica, los valores presentados en general son los típicos de la NMM. Por otra parte, se analizaron las poblaciones estelares simples contribuyentes a cada CE, y se discute la presencia de poblaciones múltiples en uno de los CE.

Abstract / Flux-calibrated integrated spectra in optical wavelength range have been obtained for a sample of 9 Large Magellanic Cloud (LMC) star clusters (SCs) at the Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO, San Juan, Argentina). Age, reddening values and metallicity were simultaneously derived using methods like equivalent width measurements, the template matching method and through evolutionary synthesis models. Also the derived chemical abundances for the sample are LMC's typical values. On the other hand, the simple stellar populations for each SC are analyzed and the presence of multiple stellar populations is confirmed in one SC.

Keywords / galaxies: individual (LMC) — galaxies: star clusters: general — techniques: spectroscopic

1. Introducción

Los cúmulos estelares (CE) son los objetos más importantes para comprender la evolución estelar y son considerados los bloques fundamentales de las galaxias. Por este motivo, conocer sus parámetros astrofísicos permite, además, determinar las propiedades principales de las galaxias que los albergan. La espectroscopía integrada ha demostrado ser una poderosa herramienta en el estudio de los CE en general, tanto de la Galaxia (e.g., Clariá et al. 2017) como en galaxias distantes (e.g., Sakari et al. 2021). En particular ha sido aplicada con éxito al estudiar CE de la Nube Mayor de Magallanes (NMM) (Ahumada et al., 2019). Finalmente, vale mencionar que Asa'd et al. (2013) encontraron que los espectros integrados de CE, cuando se comparan con modelos computacionales de alta resolución, proveen edades robustas.

En este trabajo se estudian, utilizando la mencionada técnica observacional, 9 CE de la NMM completando, en parte, el trabajo iniciado por Tapia-Reina et al. (2023).

2. Metodología

2.1. Observaciones y reducción de datos

Las observaciones fueron realizadas con el telescopio “Jorge Sahade” (2.15 m) del CASLEO (San Juan, Ar-

gentina), utilizando el espectrógrafo REOSC (modo dispersión simple). La configuración del instrumento como la técnica empleada para realizar las observaciones se encuentran en Tapia-Reina et al. (2023). La reducción de datos fue realizada de manera estándar con IRAF* (Ahumada et al., 2016) empleando el entorno Python (PyRAF) (Tapia-Reina, 2023). En la Tabla 1 se presentan las principales denominaciones y coordenadas ecuatoriales de los 9 CE, como así también el tiempo de exposición total y la razón señal-ruido S/N en 5500 – 5700 Å de cada agregado. En la Fig. 1 se presentan los espectros finales de cada uno de los 9 CE estudiados.

2.2. Determinación de parámetros

Los parámetros astrofísicos determinados fueron edad, enrojecimiento y metalicidad y se derivaron a partir de diferentes métodos (medición de anchos equivalentes, ajuste de espectros de referencia (*templates*) y síntesis espectral). Una primera determinación de edades se realizó mediante la medición de anchos equivalentes, a partir de la cual se ajustaron espectros de referencia (*templates*), tal como lo indica Tapia-Reina et al. (2023).

*Software confeccionado y continuamente actualizado por el grupo de programación IRAF del *National Optical Astronomy Observatories*, Tucson (Arizona, EE.UU.)

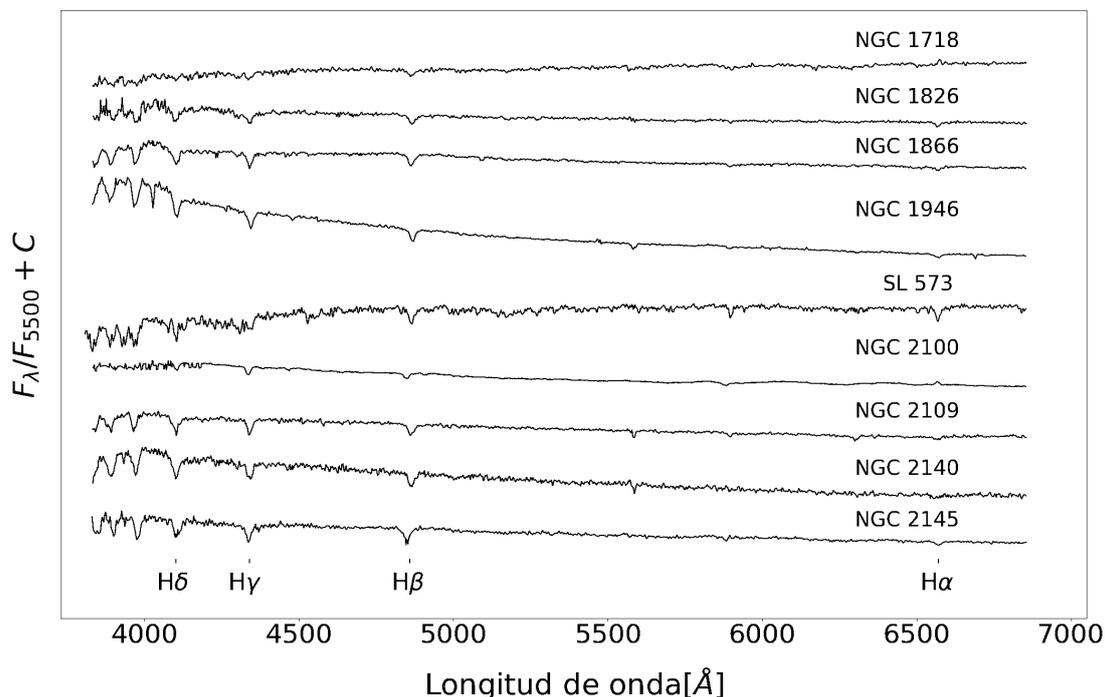


Fig. 1. Espectros finales de los CE en unidad de flujo normalizado a la unidad en $\lambda \sim 5500 \text{ \AA}$, desplazados por diferentes constantes para una mejor visualización. Se marcan las regiones correspondientes a las primeras cuatro líneas de Balmer.

Tabla 1. Muestra de CE observados.

Cúmulo	α_{2000} (h m s)	δ_{2000} ($^{\circ}$ ' ")	Exposición total (min)	S/N
NGC 1718	04 52 25	-67 03 09	95	30
NGC 1826	05 05 34	-66 13 45	110	46
NGC 1866	05 13 39	-65 27 53	70	45
NGC 1946	05 25 15	-66 23 39	40	40
SL 573	05 33 44	-64 56 06	50	29
NGC 2100	05 42 07	-69 12 27	55	42
NGC 2109	05 44 23	-68 32 49	135	35
NGC 2140	05 54 17	-68 36 00	195	20
NGC 2145	05 54 23	-70 54 08	70	35

En la Fig. 2, a modo de ejemplo, se presenta el ajuste realizado con FISA (Benítez-Llambay et al., 2012) para el CE NGC 2109. Este código, a partir de la minimización de χ^2 indica no sólo el *template* que mejor representa el espectro observado, sino también el valor de exceso de color ($E(B-V)$) por el cual se encuentra afectado el CE. También se muestra la bondad del ajuste entre el espectro integrado corregido por enrojecimiento ($E(B-V) = 0.11$) y el *template* Yg de la base escogida (Piatti et al., 2002).

Seguidamente se determinaron, además de la edad de los CE, la metalicidad de los mismos a partir del método de síntesis espectral, combinando poblaciones estelares simples (PES) (Ahumada et al., 2019; Simondi-Romero et al., 2023). Vale destacar que esta técnica permite además analizar las diferentes PES contribuyentes

a cada CE, e inferir (o no) la presencia de poblaciones múltiples. En la Fig. 3 se presentan los vectores de población estelar (PES) utilizados para sintetizar el espectro integrado de NGC 1866, donde claramente se ve que se trata de dos PES bien marcadas.

En la Tabla 2 se presentan los valores finalmente adoptados correspondientes a edad, exceso de color $E(B-V)$ y metalicidad representada con $[\text{Fe}/\text{H}]$. Vale destacar que para cada CE, la edad proviene de analizar los valores obtenidos a partir de los diferentes métodos empleados. El enrojecimiento ($E(B-V)$) corresponde al determinado del ajuste de templates y respecto a la metalicidad de los objetos, se decidió representarla a través de $[\text{Fe}/\text{H}]$ luego de convertir la abundancia Z obtenida del método de síntesis espectral, para facilitar su lectura. La precisión que acompaña los valores determinados para la edad, proviene de examinar cuidadosamente que el intervalo final comprenda los valores encontrados por todos los métodos. En el caso del $E(B-V)$, corresponde a la mínima variación necesaria para detectar un cambio en el ajuste del *template* escogido al espectro observado. Finalmente para el error de $[\text{Fe}/\text{H}]$, se asigna el indicado por González Delgado & Cid Fernandes (2010).

3. Análisis y conclusiones. Trabajo futuro

En la Fig. 4 se presenta la comparación de las edades adoptadas en este trabajo (Tabla 2) y las encontradas por diferentes autores. A través de las barras de error presentadas se puede ver que, en general, los resultados se encuentran en buen acuerdo. El amplio rango de

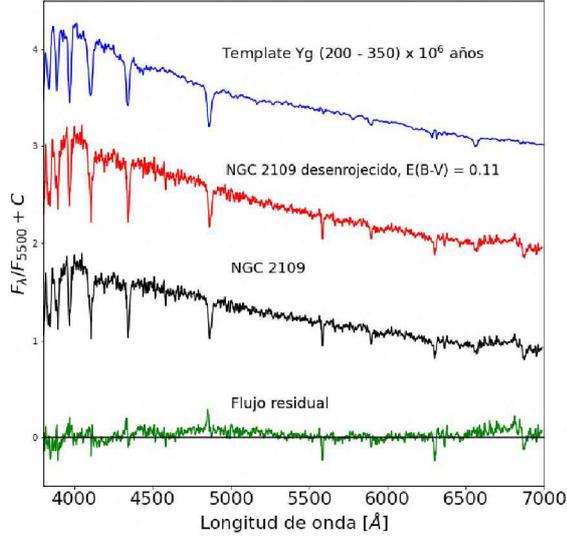


Fig. 2. Ajuste realizado con FISA para NGC 2109: Espectro observado (negro), espectro corregido por enrojecimiento (rojo) y espectro *template* Yg correspondiente a $(200 - 350) \times 10^6$ años y metalicidad solar (azul). En la parte inferior se muestra el flujo residual resultante (verde).

Tabla 2. Valores finales adoptados para la muestra de CE.

Cúmulo	Edad [$\times 10^6$ años]	$E(B-V)$ [mag]	[Fe/H]
NGC 1718	3000 ± 1000	0.25 ± 0.05	-0.1 ± 0.4
NGC 1826	500 ± 300	0.05 ± 0.02	-0.2 ± 0.4
NGC 1866	160 ± 60	0.23 ± 0.02	-0.4 ± 0.4
NGC 1946	40 ± 20	0.03 ± 0.02	-0.4 ± 0.4
SL 573	1000 ± 500	0.10 ± 0.03	-0.3 ± 0.4
NGC 2100	20 ± 10	0.32 ± 0.03	-0.2 ± 0.4
NGC 2109	160 ± 40	0.11 ± 0.02	0.0 ± 0.4
NGC 2140	100 ± 50	0.00 ± 0.05	-0.7 ± 0.4
NGC 2145	150 ± 50	0.11 ± 0.02	-0.5 ± 0.4

edades encontrado abarca: desde CE muy jóvenes con edades de 20×10^6 años, hasta CE de edad intermedia (3000×10^6 años). Por otro lado, los valores de enrojecimiento $E(B-V)$ determinados abarcan entre 0 y 0.32, siendo éstos similares a los típicos de la NMM (Zaritsky et al., 2004).

Respecto a las metalicidades, para la mayoría de los CE de la muestra, son las aquí determinadas las primeras en su tipo. Por otra parte, al analizar la Figura 3 se encuentra que STARLIGHT sólo empleó dos PES en la síntesis espectral de NGC 1866, indicando además que cada una contribuye con aproximadamente el 50%. Quizás este resultado sea un reflejo de la presencia de poblaciones estelares múltiples tal como encuentran Milone et al. (2017).

Los espectros integrados acá presentados serán utilizados, junto a otros obtenidos previamente, para poder combinar los de aquellos CE de características simila-

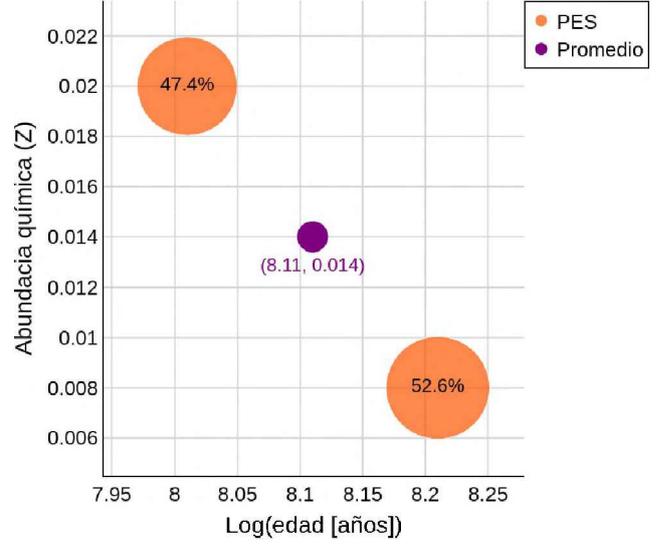


Fig. 3. PES de diferentes edades y abundancias utilizados para realizar la síntesis espectral de NGC 1866 (anaranjado), en tanto que en violeta se muestra el promedio de los aportes. La escala de los círculos anaranjados corresponde al aporte de cada PES.

res (Minniti et al., 2014). De esta manera se crearán espectros patrones que permitirán mejorar la resolución temporal de las bibliotecas existentes. Estos *templates* serán útiles no sólo para estudiar CE de la NMM, sino también de galaxias distantes en las que sólo es posible utilizar técnicas integradas.

Referencias

- Ahumada A.V., et al., 2016, *PASP*, 128, 094101
 Ahumada A.V., et al., 2019, *PASP*, 131, 024101
 Asa'd R.S., Hanson M., Ahumada A.V., 2013, *PASP*, 125, 1304
 Benítez-Llambay A., Clariá J.J., Piatti A.E., 2012, *PASP*, 124, 173
 Bica E., et al., 1996, *ApJS*, 102, 57
 Clariá J., et al., 2017, *NewA*, 56, 71
 Glatt K., Grebel E.K., Koch A., 2010, *A&A*, 517, A50
 González Delgado R.M., Cid Fernandes R., 2010, *MNRAS*, 403, 797
 Kapse S., de Grijs R., Zucker D.B., 2021, *MNRAS*, 503, 6016
 Milone A.P., et al., 2017, *MNRAS*, 465, 4363
 Minniti J.H., et al., 2014, *A&A*, 565, A49
 Niederhofer F., et al., 2015, *A&A*, 575, A62
 Piatti A.E., et al., 2002, *MNRAS*, 335, 233
 Sakari C.M., et al., 2021, *MNRAS*, 502, 5745
 Simondi-Romero F.O., Ahumada A.V., Vega-Neme L.R., 2023, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, La Plata, Argentina*, 64, 81
 Tapia-Reina M., 2023, *Trabajo Especial para optar al título de Lic. en Astronomía. FaMAF, UNC, 2023. URL: https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/547136.*
 Tapia-Reina M.I., Simondi-Romero F.O., Ahumada A.V., 2023, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, La Plata, Argentina*, 64, 87
 Zaritsky D., et al., 2004, *AJ*, 128, 1606

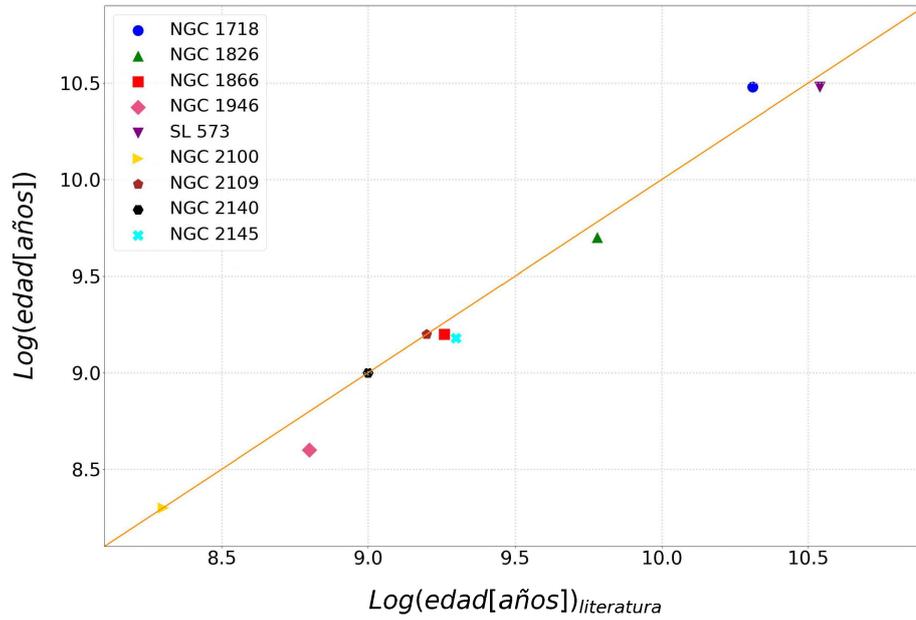


Fig. 4. Comparación de las edades determinadas en este trabajo y las derivadas por otros autores, a saber: NGC1718 (Kapse et al., 2021), NGC 1826 (Bica et al., 1996), NGC 1866 (Milone et al., 2017), NGC 1946 (Glatt et al., 2010), SL 573 (Bica et al., 1996), NGC 2100 (Niederhofer et al., 2015), NGC 2109 (Glatt et al., 2010), NGC 2140 (Glatt et al., 2010) y NGC 2145 (Glatt et al., 2010). Se señala también la relación 1:1 como referencia.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Comité Organizador Local por haber hecho posible su participación en la 65° RAAA. Extienden este agradecimiento tanto al árbitro como a los editores de este Boletín. *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.