

PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE CÚMULOS ESTELARES AZULES, COMPACTOS Y DE ALTO BRILLO SUPERFICIAL EN LA NUBE MAYOR DE MAGALLANES

Msc: Martha Lorena Talavera¹
Dra: Andrea Veronica Ahumada^{2,3,4}
Dr. Juan Jose Clariá^{3,4}.
Dr. Joao F.C. Santos Jr⁵.
Dr. Eduardo Bica⁶
Lic. M. Celeste Parisi^{3,4}

- (1) [Observatorio Astronomico Centroamericano de Suyapa, UNAH, Tegucigalpa](#)
- (2) loren.briones@gmail.com aahumada@eso.org
- (3) [European Southern Observatory- ESO, Chile](#)
- (4) [Observatorio Astronomico, Universidad Nacional de Cordoba, Argentina](#)
- (5) [CONICET, Argentina](#)
- (6) [Departamento de Fisica, ICEx, UFMG, Belo Horizonte, Brasil](#)
- (7) [Departamento de Astronomia, UFRGS, Porto Alegre, Brasil](#)

Resumen

Presentamos espectros integrados en el rango óptico (3600-6800Å) de 29 cúmulos azules compactos y de alto brillo superficial de la Nube Mayor de Magallanes (NMM). Estimamos enrojecimiento a partir del método de ajuste de templates y usando mapas de extinción interestelar en la región de los cúmulos, las edades las determinamos a partir del método de ajuste de templates y de los anchos equivalentes (AEs). En este último caso, usamos calibraciones empíricas en función de la edad, junto con diagrama de diagnóstico que involucran la suma de AEs de características espectrales seleccionadas (K Call, G band (CH), MgI, H_β, H_γ and H_δ). El rango de edades derivadas oscila entre ~5 millones y 800 millones de años. Obtuvimos un buen acuerdo entre los resultados de los dos métodos. Los espectros obtenidos mejoran y complementan las bases de datos espectrales actualmente existente para la NMM.

Palabras clave: Nube Mayor de Magallanes, cúmulos estelares, espectroscopia integrada.

Abstract

Integrated spectroscopy in the optical range (3600-6800Å) of a sample of 29 blue compact and high surface brightness Large Magellanic Cloud (LMC) star clusters is presented. Cluster reddening values were estimated using the available interstellar extinction maps, while cluster ages were derived from template matching and equivalent width (EW) methods. In the latter case, age-metallicity calibrations were used together with diagnostic diagrams involving the sum of Ews of selected spectral lines (K CaII, G band (CH), MgI, H_β, H_γ and H_δ). The derived cluster ages range from 5 to 800 Myr, a good agreement between the results of the two methods being obtained. The present cluster sample complements previous ones, in an attempt to provide a spectral library with several clusters per age interval.

Key words: Large Magellanic Cloud,

1. Introducción

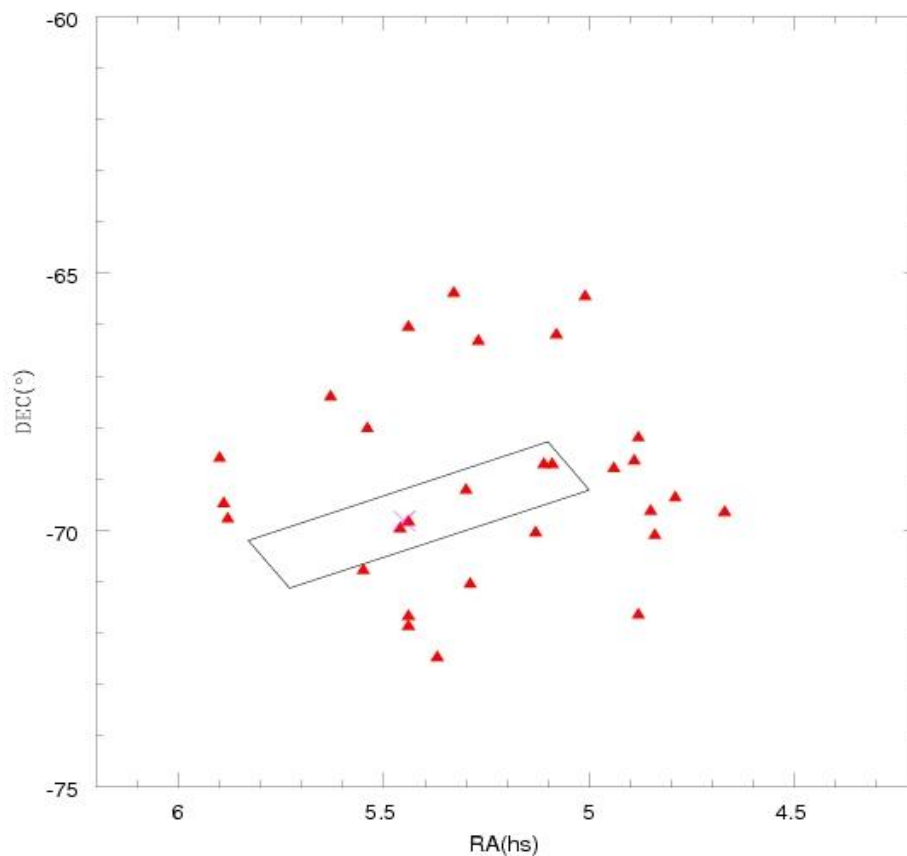
El sistema de cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes (NMM) constituye, sin lugar a dudas, un excelente laboratorio en el cual es posible examinar con cierto detalle los procesos de formación estelar y de enriquecimiento metálico ocurridos a lo largo del tiempo. Esto se debe básicamente a la riqueza, a la diversidad y a la proximidad de estos sistemas estelares de nuestra mayor galaxia satélite.

Sabemos desde hace tiempo que la Nube Mayor contiene aproximadamente 4200 cúmulos ricos en estrellas y de todas las edades, todos los cuales son comparativamente más masivos que sus pares de la misma edad de nuestra Galaxia. Una característica particularmente interesante en la Nube Mayor es que en ella parecen haber ocurrido al menos dos etapas o épocas bien diferenciadas de formación de cúmulos estelares: una época comparativamente reciente que habría dado lugar a la formación de los cúmulos más jóvenes que unos 3 mil millones de años y otra comparativamente muy vieja que habría dado lugar a la formación de los cúmulos globulares genuinos, con edades que superan los 11 ó 12 mil millones de años. Nos damos cuenta que este aparente período de “quietud” de unos 8 o 9 mil millones de años, sin formación de cúmulos, representa más del 50% de la edad de la Nube Mayor. ¿Habrá estado realmente “dormida” la NMM durante más de la mitad de su existencia?

En este trabajo nosotros presentamos y analizamos los espectros integrados de una muestra de 29 cúmulos azules, compactos, y de alto brillo superficial de la NMM, 15

de los cuales no presentan ningún estudio previo. Como vemos en la figura 1, la mayoría de los cúmulos seleccionados se encuentran proyectados muy cerca de la barra de la NMM. Utilizamos los espectros obtenidos no sólo para determinar enrojecimiento y edad de todos los objetos - ya que queremos examinar la historia de formación de cúmulos en esta galaxia - sino también para construir nuevos espectros *templates* correspondientes a la metalicidad típica de esta galaxia.

Figura 1. Posición de los 29 cúmulos estudiados (triángulos) en relación al centro óptico (cruz) y la barra de la Nube Mayor de Magallanes (rectángulo).



2. OBSERVACIONES ESPECTROSCÓPICAS

Todos los espectros los obtuvimos con el telescopio de 2.15 m del Complejo Astronómico El Leoncito en San Juan (Argentina), utilizando un CCD de 1024x1024 píxeles, el espectrógrafo REOSC en el modo de “dispersión simple” y una red de 300 líneas/mm. La dispersión resultante fue de 3.46 Å/píxel. El ancho de la ranura lo elegimos en 4.2”, lo que produce una resolución de ~ 14 Å. Los espectros integrados que vemos en las figuras 2, 3 y 4, los obtuvimos “paseando” la ranura sobre cada objeto en la dirección norte-sur, salvo excepciones. Todos los espectros en esta figura han sido calibrados en unidades de flujo, normalizados a la unidad en $\lambda \sim 5800$ Å y desplazados por constantes arbitrarias para facilitar su comparación. Las diferentes pendientes en las distribuciones de energía del continuo de los espectros observados, reflejan efectos combinados de edad y enrojecimiento.

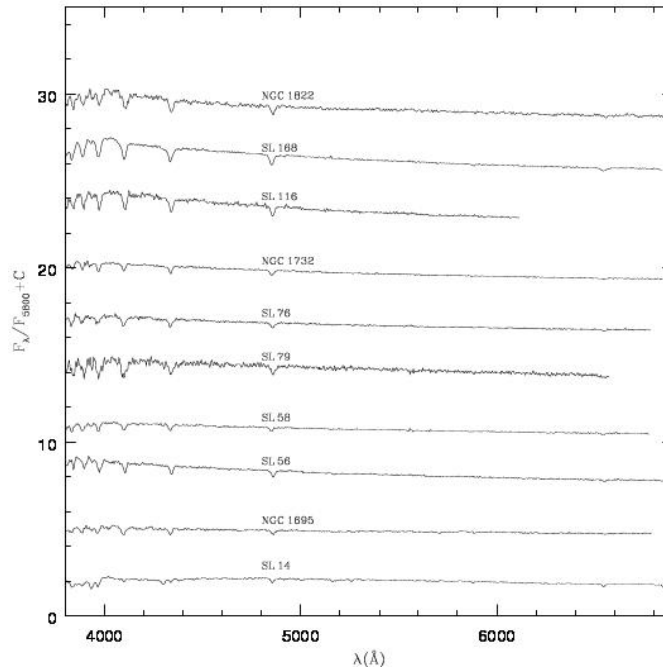


Figura 2. Espectros integrados observados de 10 cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes. Los espectros están calibrados en unidades relativas de flujo, han sido normalizados a la unidad en $\lambda \approx 5800$ Å y desplazados por constantes arbitrarias.

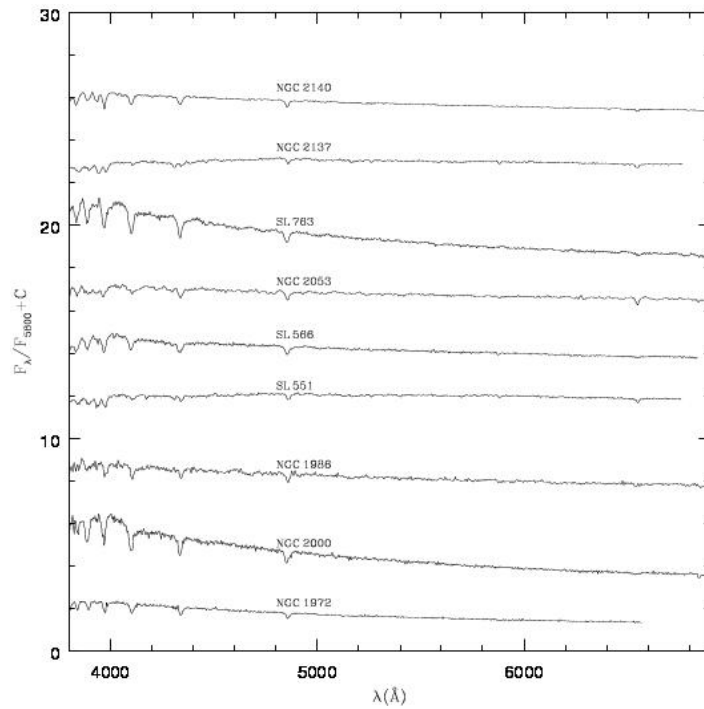


Figura 3. Espectros integrados observados de 10 cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes. Los espectros están calibrados en unidades relativas de flujo, han sido normalizados a la unidad en $\lambda \approx 5800 \text{ \AA}$ y desplazados por constantes arbitrarias.

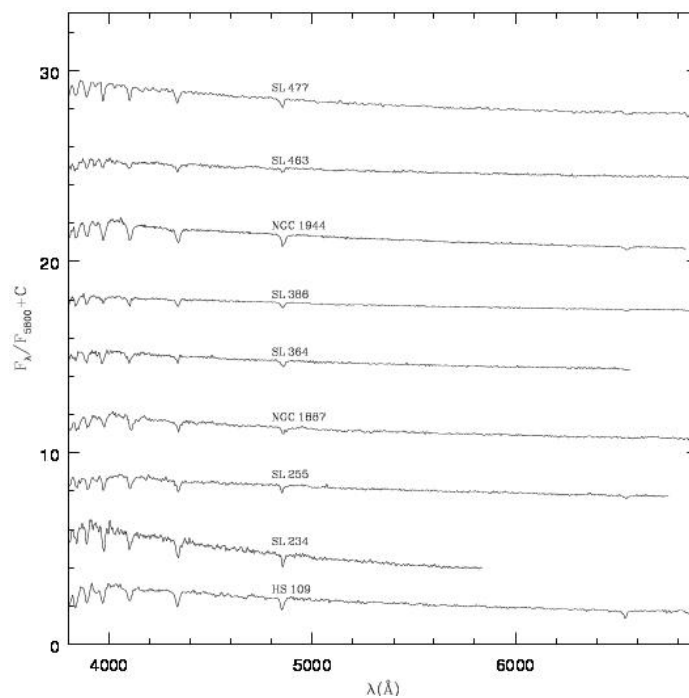


Figura 4. Espectros integrados observados de 10 cúmulos estelares de la Nube Mayor de Magallanes. Los espectros están calibrados en unidades relativas de flujo, han sido normalizados a la unidad en $\lambda \approx 5800 \text{ \AA}$ y desplazados por constantes arbitrarias.

3. DETERMINACIÓN DE ENROJECIMIENTO Y EDAD: AJUSTE DE TEMPLATES Y ANCHOS EQUIVALENTES

Para determinar las edades de los cúmulos aplicamos dos métodos independientes: el método de “ajuste de templates” y un método basado en la medición de anchos equivalentes (AEs). El primer método consiste en obtener el mejor ajuste posible entre el espectro del cúmulo analizado y el de un template de edad y metalicidad conocida. En este proceso, seleccionamos de entre todos los espectros templates disponibles, aquél que minimiza el denominado flujo residual. A partir de este método determinamos simultáneamente exceso de color $E(B-V)$ y edad. En las figuras **5**, **6** y **7** mostramos las comparaciones de los espectros observados (corregidos por enrojecimiento) de los cúmulos SL 168, SL 551 y SL 360, con los templates de la base de Piatti y colaboradores (2002) que mejor reproducen el conjunto global de sus características. Las comparaciones son realmente excelentes en casi todos los casos.

Para el segundo método, medimos AEs de determinadas características espectrales y utilizamos diagramas de diagnóstico que involucran la suma de los AEs de líneas espectrales seleccionadas, juntamente con las respectivas calibraciones de edad y metalicidad obtenidas por Santos y Piatti (2004). En pocas palabras, medimos primero los AEs de las primeras 4 líneas de Balmer, de la línea K del calcio ionizado, de la banda G de CH (hidrocarburo) y del triplete de MgI en $\sim 5170 \text{ \AA}$. Luego, formamos la suma de los AEs de las 3 características metálicas y de las 3 líneas de Balmer H_β , H_γ y H_δ y las llamamos S_m y S_h , respectivamente. Dado que el AE de cada línea de Balmer es una función bivaluada de la edad, usamos la suma S_m para obtener una primera estimación de la edad a partir de la expresión:

$$\log t = a_0 + a_1 + a_2 (S_m)^2,$$

en la cual la edad t está expresada en miles de millones de años y los coeficientes han sido determinados por Santos y Piatti (2004). Luego, guiados por este primer

valor, usamos la suma S_h para obtener una segunda estimación de la edad, ya que para S_h hay dos soluciones posibles:

$$\log t = -b \pm [(b^2 - 4a(c - S_h))^{1/2}/(2a),$$

en la cual t está en las mismas unidades y los coeficientes a , b y c también han sido determinados por Santos y Piatti (2004).

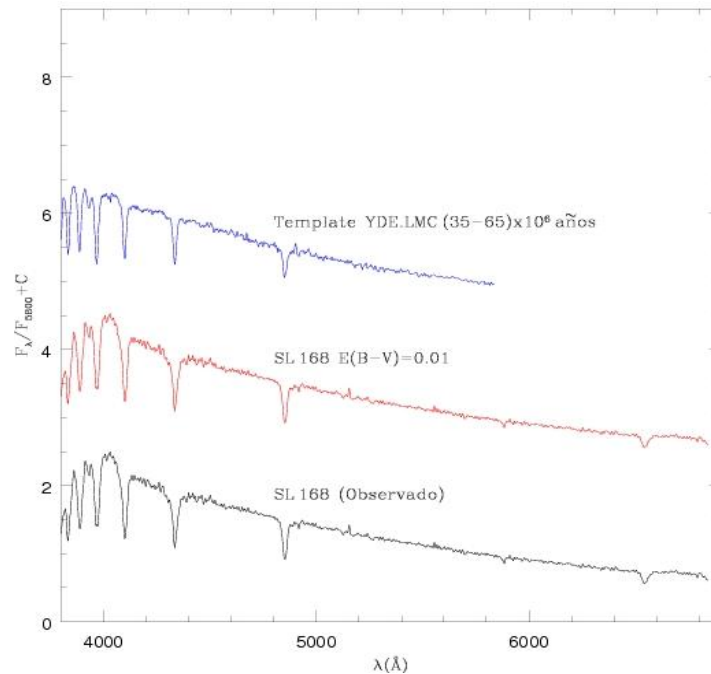


Figura 5. Espectro observado de SL 168 (abajo), el espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template que mejor se ajusta

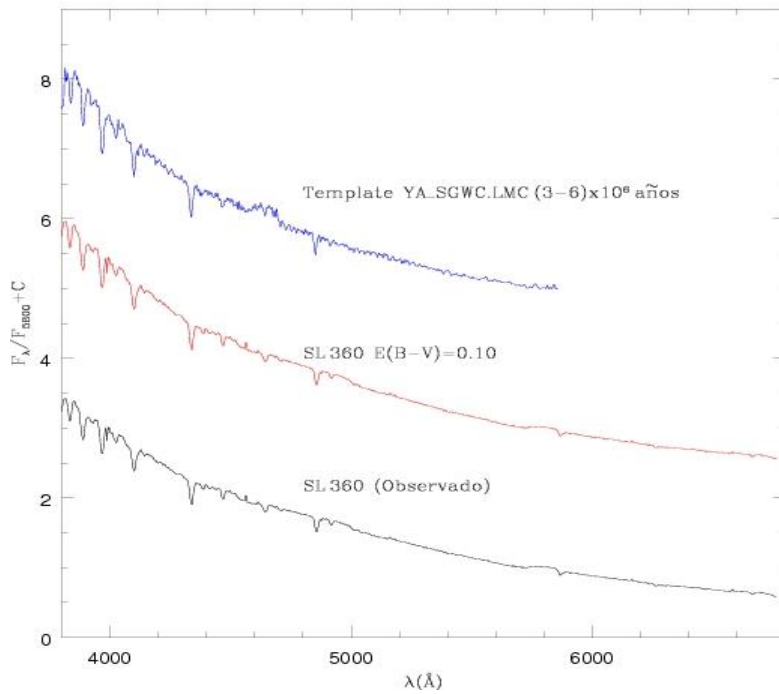


Figura 6. El espectro observado (abajo), el espectro corregido por enrojecimiento (medio) y el template que mejor se ajusta (arriba).

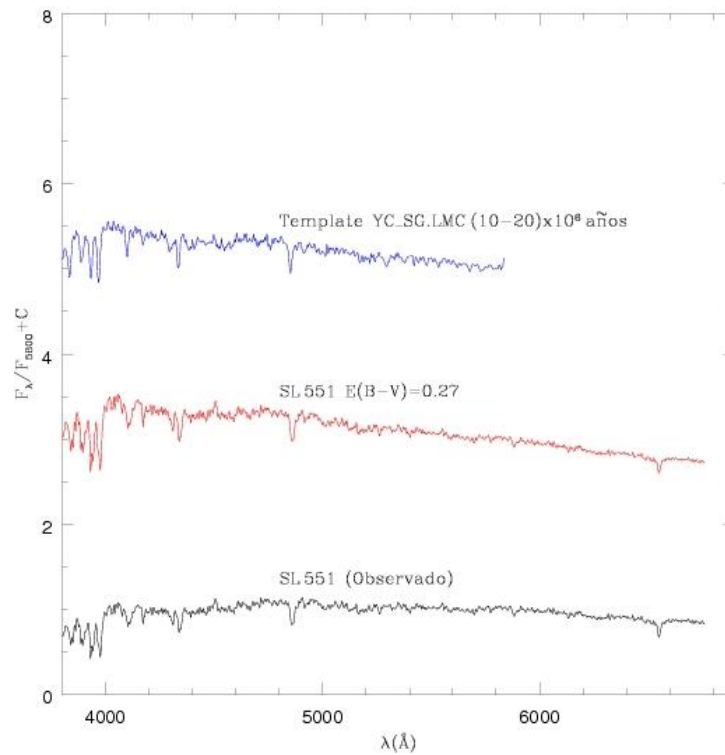


Figura 7. Espectro integrado de SL 551 (abajo), el espectro integrado corregido por $E(B-V)=0.27$ (medio) y el template que mejor se ajusta.

En la **Tabla 1** mostramos los resultados finalmente obtenidos para los 29 cúmulos estudiados. Las sucesivas columnas presentan: los excesos de color $E(B-V)$ derivados a partir del método de ajuste de templates, aquellos derivados usando los mapas de extinción interestelar publicados por Burstein y Heiles (1982), las edades inferidas a partir de las líneas de Balmer, aquellas determinadas por los dos métodos antes mencionados (AEs y ajuste de templates) y las edades finalmente adoptadas. Vemos que existe un acuerdo razonablemente bueno entre las edades inferidas por los dos métodos mencionados.

Tabla 1. Resultados obtenidos para los 29 cúmulos de la Nube Mayor de Magallanes.

Objeto	$E(B-V)$ Template	$E(B-V)$ B&H	Edad Balmer ($\times 10^6$ años)	Edad S_h, S_m ($\times 10^6$ años)	Edad template ($\times 10^6$ años)	Edad adoptada ($\times 10^6$ años)
SL14	0.18 ± 0.02	0.08	10-20	8	10-20	10 ± 5
NGC1695	0.16 ± 0.02	0.06	50-110	69	50-110	70 ± 10
SL56	0.05 ± 0.02	0.10	12-40	18	12-40	40 ± 20
SL58	0.13 ± 0.03	0.10	65	51	65	60 ± 10
SL79	0.06 ± 0.02	0.09	100	115	100	100 ± 10
SL76	0.06 ± 0.02	0.03	12-40	28	50 ± 30	50 ± 30
	0.08 ± 0.02					
NGC1732	0.00	0.03	50	20	65	60 ± 10
SL116	0.00	0.06	50-70	34	35-65	60 ± 20
SL168	0.01 ± 0.01	0.03	100	23	35-65	60 ± 20
NGC1822	0.05 ± 0.02	0.04	50-100	12	100-150	125 ± 25
HS109	0.08 ± 0.02	0.06	50-100	110	35-65	70 ± 20
SL 234	0.00	0.06	50	24	50	60 ± 20
SL255	0.10 ± 0.02	0.10	10-100	22	45-75	60 ± 10

NGC1887	0.05 ± 0.02	0.04	30-50	18	45-75	60 ± 20
SL364	0.02 ± 0.01	0.09	~50	19	40	40 ± 10
SL360	0.10 ± 0.02	0.07	< 10	05	3-6	5 ± 2
SL386	0.17 ± 0.02	0.03	30-50	16	60	70 ± 20
NGC1944	0.07 ± 0.02	0.07	50-100	22	45-75	60 ± 10
SL463	0.1 ± 0.02	0.06	10-50	22	35-65	50 ± 10
SL477	0.03 ± 0.01	0.07	10-50	14	35-65	40 ± 20
NGC1972	0.00	0.07	30-50	20	70	60 ± 10
NGC2000	0.02 ± 0.01	0.07	50-100	42	40	50 ± 10
NGC1986	0.10 ± 0.02	0.07	10-50	23	45-75	50 ± 20
SL551	0.27 ± 0.02	0.07	10-30	171	10-20	20 ± 10
SL566	0.15 ± 0.02	0.09	10-50	22	45-75	50 ± 10
NGC2053	0.08 ± 0.02	0.06	~50	21	50-110	70 ± 30
SL763	0.04	0.08	50-100	41	45-75	70 ± 20
NGC2137	0.05 ± 0.02	0.07	1000	286	1000	800 ± 200
NGC2140	0.00	0.06	50-100	60	50-110	60 ± 20

4. EDADES VS. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Usando el mismo telescopio y las mismas técnicas que nosotros, Santos y colaboradores (2006) determinaron recientemente edades y enrojecimientos de 17 cúmulos jóvenes de la NMM. Si agregamos esta muestra a la nuestra, disponemos entonces de 46 cúmulos jóvenes con edades derivadas homogéneamente. Por otra parte, usando el sistema de Washington y el método de ajuste de isócronas, Piatti y colaboradores (2003) determinaron recientemente edades y metalicidades de 37 cúmulos de la Nube Mayor en un amplio rango de edades. En la figura 8 vemos la distribución espacial proyectada de la muestra total de 83 cúmulos, en la cual las coordenadas ecuatoriales absolutas (α y δ) son relativas al centro de la Nube Mayor. En el panel inferior de esta figura discriminamos los cúmulos por edad. Resulta claro en esta figura que existe una tendencia general de los cúmulos más viejos a ubicarse en las regiones del disco exterior, mientras que los más jóvenes tienden a aglutinarse en las proximidades de la barra. Este efecto es aún más claramente visible en la figura

9 en la cual graficamos las distancias deproyectadas en función de la edad. Las distancias deproyectadas las calculamos usando una inclinación de 45° entre el plano del cielo y el disco exterior de la Nube Mayor y un ángulo de posición de la línea de los nodos de 7° (Lynga y Westerlund 1963). Quisiera destacar que la tendencia mencionada en la distribución espacial de los cúmulos es enteramente compatible con los resultados encontrados por Smecker-Hane y colaboradores (2002) al examinar la historia de formación estelar en la Nube Mayor en base a observaciones realizadas con el Telescopio Espacial. La tasa de formación estelar parece haber aumentado hace aproximadamente 2000 millones de años tanto en el disco como en la barra, manteniéndose constante en la barra y habiendo disminuido más recientemente en el disco.

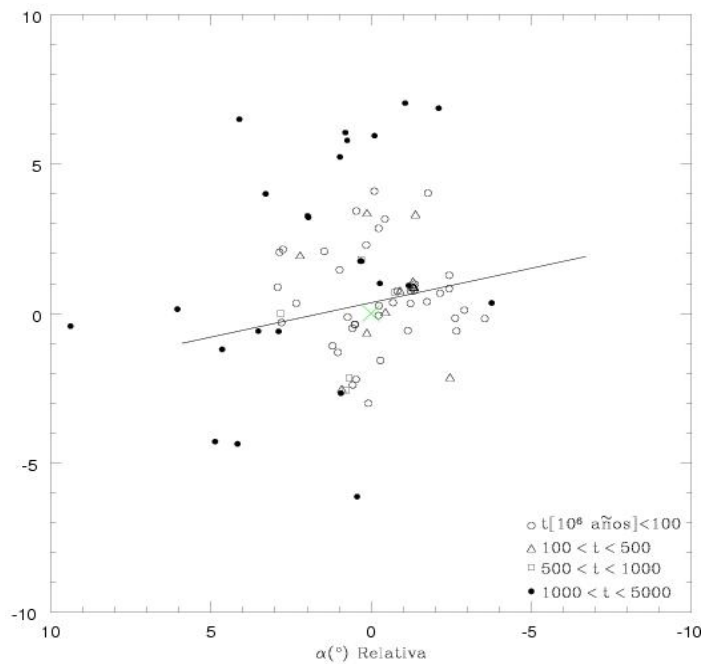


Figura 8. Distribución espacial de 83 cúmulos estelares en la Nube Mayor de Magallanes. Las coordenadas ecuatoriales son relativas al centro de la Nube Mayor, que se indica con una cruz, en tanto que también la barra se indica señalada

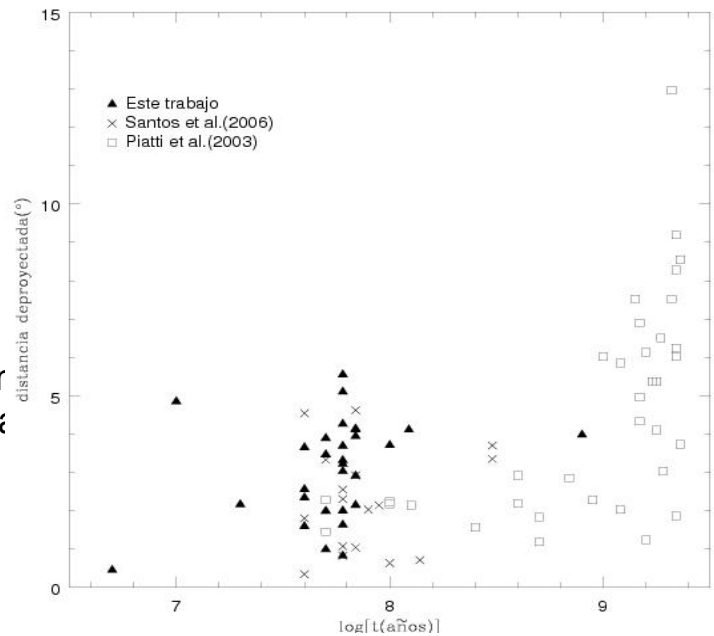


Figura 9. Distancia deproyectada en función de la edad de las Nubes de Magallanes en

5. EDADES VS. COLORES INTEGRADOS

Usando el mismo telescopio de 2.15 m del CASLEO, Bica, Clariá y colaboradores (1996) obtuvieron fotoeléctricamente colores (U-B) y (B-V) integrados de 624 cúmulos y asociaciones estelares de la Nube Mayor. En la figura 10 vemos como cambian estos colores con la edad para la muestra global de 83 cúmulos. Sólo hemos incluido en esta figura los cúmulos con fotometría UBV integrada. Observamos la notable discontinuidad existente en la distribución de los colores integrados, debida probablemente a la evolución natural de los cúmulos, en el sentido de que los mismos tienden a ser más ricos en metales cuanto más reciente ha sido su formación.

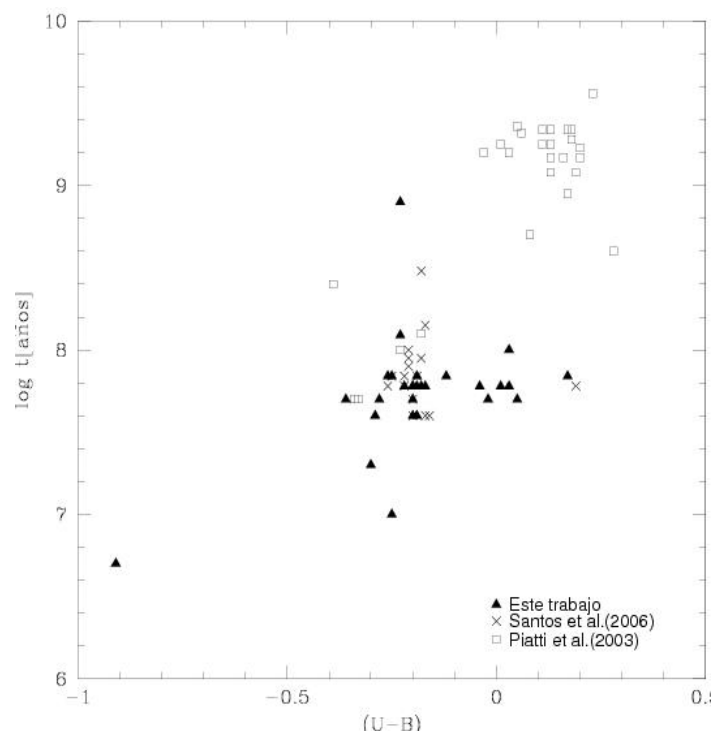


Figura 10. Distribución de la edad con respecto a los colores integrados para los 83 cúmulos antes mencionados.

6. CONCLUSIONES

1. En resumen, 26 de los 29 cúmulos observados resultaron ser jóvenes con edades comprendidas entre 5 y 70 millones de años; 2 objetos (SL 79 y NGC 1822) son moderadamente jóvenes con una edad de ~ 100 millones de años y sólo uno (NGC 2137) podría considerarse de edad intermedia. Los excesos de color E (B-V) derivados espectroscópicamente oscilan entre ~ 0.0 (NGC 1732) y ~ 0.18 magnitudes (SL 14). SL 551 presenta un exceso de color E(B-V) atípicamente elevado, el cual supera la media en 0.10 magnitudes.

2. Existe una clara tendencia general de los cúmulos más viejos de la Nube Mayor a ubicarse en las regiones del disco exterior, mientras que los más jóvenes se aglutinan en las proximidades de la barra. Este efecto es aún más visible cuando se grafican las distancias deproyectadas en función de la edad.

3. La tasa de formación estelar parece haber aumentado hace aproximadamente 2000 millones de años tanto en el disco como en la barra, manteniéndose constante en la barra y habiendo disminuido más recientemente en el disco.

4. Se advierte una notable discontinuidad en la distribución de los colores integrados, debida probablemente a la evolución natural de los cúmulos, en el sentido de que los mismos tienden a ser más ricos en metales cuanto más reciente ha sido su formación.

Bibliografía

Bica, Eduardo, Clariá, Juan José, Dottori, H, Santos, J. F.C Jr, and Piatti, Andrés. E. "Integrated UBV photometry of 624 star clusters and associations in the Large Magellanic Cloud". *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 1996. (102): 57.

Burstein, David and Heiles, Carl.. "Reddenings derived from HI and Galaxy counts: Accuracy and maps". *Astronomical Journal*. 1982. (87): 1165.

Lynga, G. and Westerlund, B.E.. "A catalogue of clusters in the ourter parts of the Large Magellanic Cloud". *Monthly Notices Royal Astronomical Society*. 1963. (127): 31.

Piatti, Andrés E, Bica, Eduardo, Clariá, Juan José, Santos, João F. C. and Ahumada, Andrea V. "Integrated spectral evolution of Galactic open clusters". Monthly Notices Royal Astronomical Society. 2002. (335): 233.

Piatti, Andrés E, Bica, Eduardo, Geisler, Doug and Clariá, Juan José.. "Fundamental parameters of the LMC clusters NGC1836, NGC1860, NGC1865, SL444, LW224 and SL 548". Monthly Notices Royal Astronomical Society. 2003. (344): 965.

Santos, Jr, J.F.C. and Piatti, A. E.. "Ages and metallicities of star clusters new calibrations and diagnostic diagrams from visible integrated spectra". Astronomy and Astrophysics. 2004. (428): 79.

Santos, J.F.C Jr, Clariá, J. J, Ahumada, A. V, Bica, E. Piatti, A. E, and Parisi, M. C. "Spectral evolution of star clusters in the Large Magellanic Cloud". Astronomy and Astrophysics. 2006. (448): 1023.

Smecker-Hane, Tammy A, Cole, Andrew A, Gallagher, John S, and Stetson, Peter B. "The star formation history of the Large Magellanic Cloud". Astrophysical Journal. 2002. (566): 239.