

ESTRUCTURA DEL DIAGRAMA HR PARA GIGANTES ROJAS DE POBLACION I DE MASAS INTERMEDIAS

J. J. Clariá , E. Lapasset

Observatorio Astronómico de Córdoba, Argentina

y D. Minniti

Steward Observatory, University of Arizona, USA.

RESUMEN. Se examina la estructura del diagrama HR (seudorrama horizontal y rama gigante) para gigantes rojas de población I de masas intermedias, a partir de fotometría multicolor (UBV, DDO y CMT1T2) de cúmulos abiertos pertenecientes a los grupos de edad de NGC 3532 y 6475. Las gigantes rojas de ambos grupos definen una única isócrona empírica, prácticamente indistinguible, con una concentración de estrellas en la etapa de combustión del helio central. Un análisis de los parámetros de abundancia basados en las regiones azul-violeta, azul-verde y verde-roja del espectro, demuestra que todos los cúmulos observados son químicamente homogéneos. Las abundancias medias obtenidas oscilan entre $[Fe/H] = -0.23 \pm 0.08$ en NGC 4349 y $[Fe/H] = +0.18 \pm 0.15$ en NGC 5316. Determinaciones aproximadas de masas individuales sugieren que las gigantes rojas en 4 de los 5 cúmulos estudiados podrían haber perdido parte de su masa durante esa fase evolutiva.

ABSTRACT. The structure of the HR diagram (clump and giant branch) for intermediate mass population I red giants is examined on the basis of multicolour photometry (UBV, DDO, and CMT1T2) of open clusters belonging to the NGC 3532 and NGC 6475 age groups. The red giants of both groups define a single, practically indistinguishable, empirical isochrone with a clump of stars in the helium-core burning phase of evolution. An analysis of abundance parameters based on the blue-violet, blue-green, and green-red spectral regions, supports the conclusion that the observed clusters are all chemically homogeneous. The derived mean abundances range between $[Fe/H] = -0.23 \pm 0.08$ in NGC 4349 to $[Fe/H] = +0.18 \pm 0.15$ in NGC 5316. The mass results suggest that the red giants in four of the five clusters studied could have undergone mass loss during their red giant stage of evolution.

Key words: STARS-HERTZRUNG-RUSSEL DIAGRAM — STARS-POPULATION I

1. INTRODUCCION

El conocimiento que hoy tenemos sobre la fase gigante roja en la historia evolutiva de las estrellas es poco preciso e incompleto. Esta falencia se debe a la falta de datos observacionales suficientemente precisos y numerosos que puedan ser comparados con las predicciones teóricas. Los cúmulos abiertos constituyen excelentes candidatos para efectuar tales comparaciones. Sin embargo, la escasez de gigantes rojas en cúmulos jóvenes y de edades intermedias, conduce a la necesaria superposición de diagramas HR de agregados con edades y metalicidades similares.

Se han efectuado mediciones fotométricas en 11 bandas espectrales por estrella (3 del sistema UBV y 4 de los sistemas DDO y Washington, respectivamente) de un total de 34 posibles gigantes rojas de los cúmulos abiertos NGC 3532, 4349, 5316, 6281 y 6494. Las observaciones fueron realizadas con el telescopio canadiense de 60 cm del Observatorio de Las Campanas (Chile) y con los telescopios de 60 cm y 1.0 m del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo (Chile). Fotomultiplicadoras EMI 9658, S-20, RCA 31034A y Hamamatsu R943-02, fueron utilizadas para las diferentes mediciones en los 3 sistemas mencionados. El material observacional recopilado para las gigantes rojas de los 5 cúmulos abiertos ha sido recientemente publicado por Clariá y Lapasset (1988, 1989), Clariá y Minniti (1988) y Clariá et al. (1989). NGC 3532 es uno de los pocos cúmulos ricos en estrellas y de edad intermedia que, a pesar de su proximidad al sol (400 pc), no registra estudios previos de abundancia. Algo similar ocurre con los cúmulos abiertos NGC 4349, 5316, 6281 y 6494, si bien estos objetos - cuyas edades son bastante próximas a la de NGC 3532 - se ubican a mayores distancias del sol.

La separación entre estrellas rojas del campo y miembros físicos de los cúmulos, se llevó a cabo mediante la aplicación de dos criterios independientes descriptos en trabajos anteriores (Clariá y Lapasset 1983, Clariá 1985), en tanto que los excesos de color $E(B-V)$ fueron determinados a partir de datos UBV y DDO combinados utilizando un procedimiento iterativo descripto por Janes (1977). Los resultados pueden verse en las Tablas 5, 6, y 5 de Clariá y Lapasset (1988), Clariá y Lapasset (1989) y Clariá et al. (1989), respectivamente.

II. METALICIDADES Y DISTANCIAS

La determinación de metalicidades se llevó a cabo haciendo uso de la información fotoeléctrica proveniente de diferentes regiones del espectro. Los parámetros de abundancia basados en la región azul-violeta reflejan no sólo el efecto blanketing metálico, debido principalmente al hierro y elementos de su familia, sino también la presencia de bandas moleculares de CN y CH, típicas de las gigantes rojas. En consecuencia, la comparación de los distintos parámetros de abundancia debería permitir detectar sobreabundancias o subabundancias de compuestos moleculares que incluyan elementos del grupo CNO.

Como indicadores de abundancia se usaron los parámetros δCN (anomalía de cianógeno), $\delta(U-B)$ (exceso ultravioleta), $\Delta(C-M)$ y $\Delta(M-T1)$ de la fotometría DDO, UBV y Washington, respectivamente. Estos parámetros recogen información de abundancia en diferentes regiones espectrales entre aproximadamente 3500 y 6500 Å. Todos ellos han sido calibrados en términos de $[\text{Fe}/\text{H}]$, de manera que para cada cúmulo se adoptó finalmente el valor medio, asignando peso unitario a $\delta(U-B)$ y peso doble a los restantes parámetros. Dado que se trata de estrellas tardías con tipos espectrales en el rango G5III - K3III, el exceso de color $E(U-B)$ puede obtenerse a partir del valor $(B-V)$ observado y el exceso $E(B-V)$ antes calculado, usando la expresión (7) de Janes (1979), la cual reproduce los resultados de Crawford y Mandwewala (1976) dentro del 1% de $E(B-V)$. Los colores intrínsecos $(B-V)_0$ y $(U-B)_0$ fueron entonces calculados usando los $E(B-V)$ derivados del método de Janes (1977). Los excesos ultravioletas $\delta(U-B)$ resultaron de comparar, para cada gigante roja, los índices $(U-B)_0$ y $(B-V)_0$ observados con los valores normales publicados por FitzGerald (1970) para estrellas gigantes tardías. Dichos excesos han sido pues calculados con respecto a las gigantes rojas del campo y no, como suele ser usual, con respecto a las estrellas de la secuencia principal de las Hyades. Estos valores son directamente comparables a los δCN , basados también en estrellas del campo.

Las abundancias medias que resultan para las gigantes rojas de cada cúmulo se presentan en la Tabla 1. Las metalicidades obtenidas de los índices de Washington, en cada cúmulo por separado, presentan en general buen acuerdo. Existen, sin embargo, algunas diferencias cuando se comparan estos valores con las abundancias DDO en dos de los cinco cúmulos estudiados. El promedio de los índices de contaminación $\Delta F = |[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{MT}} - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{CM}}|$ no supera el valor 0.15 en 4 de los 5 cúmulos. Sólo en NGC 5316 este índice resulta algo mayor ($\Delta F = 0.24$). No existen pues evidencias de sobreabundancias de elementos del grupo CNO en ninguno de los sistemas estudiados.

TABLA 1. PARAMETROS DE ABUNDANCIA DE LAS GIGANTES ROJAS ESTUDIADAS

Cúmulo	NGC 3532	NGC 4349	NGC 5316	NGC 6281	NGC 6494
[Fe/H] _{DDO}	0.02 ±.05	-0.24 ±.08	0.03 ±.08	0.07 ±.09	0.03 ±.03
[Fe/H] _{UBV}	0.06 ±.04	--	0.10 ±.08	-0.14 ±.10	--
[Fe/H] _{CM}	0.10 ±.10	-0.30 ±.14	0.39 ±.09	-0.22 ±.12	-0.20 ±.07
[Fe/H] _{MT}	0.05 ±.05	-0.15 ±.05	0.15 ±.09	-0.09 ±.03	-0.25 ±.05

Las magnitudes absolutas M_v fueron estimadas a partir de los índices DDO corregidos por "efectos de metalicidad" según un factor $\Delta M_v = 0.4 - 4\delta_{\text{CN}}$. Las distancias medias obtenidas se muestran en la Tabla 2.

III. COMPARACION CON MODELOS EVOLUTIVOS

Una vez discriminados los miembros físicos de cada agregado y conocidas las metalicidades y distancias medias de los mismos, es posible comparar las observaciones con las predicciones teóricas. Ello exige, sin embargo, el cálculo previo de algunos parámetros físicos que no pueden ser directamente observados. Las temperaturas y gravedades superficiales se derivaron de los índices Co(42-45) y Co(45-48) y las calibraciones empíricas de Osborn (1973) y Osborn y Clariá (1976). Puesto que las calibraciones DDO se basan en estrellas de composición solar, los índices DDO intrínsecos fueron ligeramente corregidos por efecto blanketing siguiendo el procedimiento descrito por Clariá y Lapasset (1983). Las magnitudes absolutas bolométricas, luminosidades, y masas individuales, se obtuvieron de las siguientes expresiones:

$$M_b = V + B.C. - v - 3.0 E(B-V), \quad (1)$$

$$\log L/L_0 = -0.4[V + B.C. - v - 3.0 E(B-V) - 4.74], \quad (2)$$

$$\log M/M_0 = \log g - 0.4M_b - 4 \log T_e + 12.49, \quad (3)$$

donde $v = V_0 - M_v(\text{DDO})$ es el módulo de distancia inferido a partir de datos UBV y DDO, y B.C. la corrección bolométrica tomada de Schlesinger (1969).

En la Figura 1 se compara la distribución observada de estrellas en la región gigante roja del diagrama $[\log L/L_0, \log T_e]$ con los modelos de Becker (1981). Si se omite NGC 5316 por ser algo más joven que los 4 cúmulos restantes, la metalicidad media de éstos resulta $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.10 \pm 0.06$. De acuerdo a Mermilliod (1981),⁸ NGC 4349, 6281 y 6494 pertenecen al grupo de edad de NGC 6475 ($\tau = 2.24 \times 10^8$ años), en tanto que NGC 3532 es ligeramente más viejo ($\tau = 2.69 \times 10^8$ años). Las gigantes rojas de estos 4 cúmulos, sin embargo, definen en la Fig. 2 una única isócrona empírica válida para una edad típica de 2.4×10^8 años. En dicha figura se han graficado las trayectorias evolutivas teóricas de Becker para modelos correspondientes a 3 y 5 masas solares, con $Y = 0.28$ y $Z = 0.02$. Se advierte que una buena proporción de gigantes rojas se ubican dentro de una banda de 0.03 de ancho en $\log T_e$, centrada en $\log L/L_0 = 2.28$ y $\log T_e = 3.70$. Esta región ha sido identificada por Cannon (1970) y Faulkner y Cannon (1973) como la equivalente a la rama horizontal de los cúmulos globulares. Según la teoría, estas estrellas se encuentran en una etapa evolutiva durante la cual se produce la quemazón del helio del núcleo estelar.

Tal como ha sido encontrado en otros cúmulos abiertos (ver, por ejemplo, Dawson 1978, Clariá 1979, 1985, Clariá y Lapasset 1983, 1986), las masas medias de las gigantes rojas en los cúmulos estudiados resultan ser sistemáticamente más bajas que los valores teóricos esperados, excepto quizás en NGC 3532. Esto sugiere que las gigantes rojas podrían haber perdido parte de su masa antes de alcanzar la fase de ignición del helio en el núcleo estelar.

TABLA 2. PROPIEDADES ASTROFISICAS DE LAS GIGANTES ROJAS

Cúmulo	NGC 3532	NGC 4349	NGC 5316	NGC 6281	NGC 6494
$\langle E(B-V) \rangle$	0.07 $\pm .02$	0.34 $\pm .03$	0.33 $\pm .03$	0.17 $\pm .01$	0.40 $\pm .02$
$\langle V_0 - M_V(DDO) \rangle$	8.3 $\pm .2$	11.2 $\pm .5$	10.2 $\pm .4$	8.6 $\pm .2$	9.4 $\pm .5$
d(pc)	470	1740	1100	520	760
[Fe/H] (Adoptado)	0.06 $\pm .03$	-0.23 $\pm .08$	0.18 $\pm .15$	-0.09 $\pm .12$	-0.14 $\pm .15$
Masa media (gig. rojas)	3.3 $\pm .8$	1.4 $\pm .2$	2.2 $\pm .5$	1.5 $\pm .5$	1.5 $\pm .4$

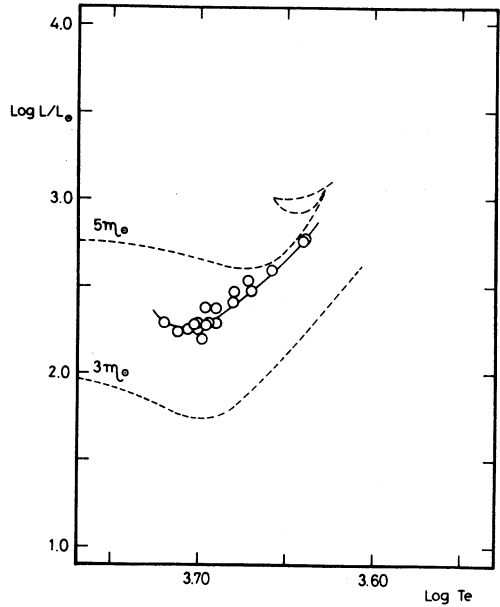


Figura 1. Isócrona empírica correspondiente a una edad de 240 millones de años. Las líneas a trazos son las trayectorias evolutivas teóricas de Becker (1981) para modelos de 3 y 5 masas solares con $Y = 0.28$ y $Z = 0.02$.

Concientes de la fragilidad del método empleado para determinar masas, pensamos que nuestros resultados podrían quizás deberse a imprecisiones en las observaciones fotométricas o a una pobre determinación de algunas de las variables de las cuales depende la masa. Si bien es cierto que un error de 0.01 en el índice $C(45-48)$ implica un error de 0.2 en $\log g$ (o bien, un error de un factor ± 1.5 en las masas), parece poco probable que un error medio del orden de 0.008 en ese índice (típico de nuestros datos) pueda ser el responsable de las bajas masas derivadas. Por otra parte, suponer que errores en los puntos ceros de las calibraciones usadas puedan conducir sistemáticamente a subestimar las masas, tampoco parece probable en virtud de que el mismo procedimiento ha sido utilizado por Osborn (1974) en M67 y las masas obtenidas concuerdan razonablemente bien con las determinaciones independientes. Es cierto que una disminución en el valor de $[Fe/H]$ o un aumento en $E(B-V)$ provocaría un incremento en las masas calculadas. Sin embargo, parece razonable desechar también estas dos posibilidades por dos motivos: (1) Con excepción quizás de las abundancias DDO de NGC 6281 y 6494, las metalicidades inferidas para los 5 cúmulos, por distintos procedimientos, muestran en general un acuerdo satisfactorio. (2) Los enrojecimientos me-

dios obtenidos para cada cúmulo coinciden, dentro de los errores, con los valores inferidos por otros autores a partir de diferentes procedimientos (ver Clariá y Lapasset 1988, 1989 y Clariá et al. 1989).

Finalmente, deberíamos considerar el efecto que sobre las masas produce un error en la distancia. Cálculos simples muestran que, excepto en NGC 3532, deberían incrementarse los módulos de distancia en aproximadamente una magnitud para obtener masas medias del orden de las predichas por los modelos teóricos. No obstante las imprecisiones involucradas en la determinación de masas individuales, pensamos que los presentes resultados podrían estar indicando efectos de pérdida de masa en las gigantes rojas de 4 de los 5 cúmulos estudiados.

IV. CONCLUSIONES

Se ha examinado la estructura y morfología del diagrama HR para estrellas gigantes rojas de población I de masas intermedias (3-5 $M_{\odot}$). El análisis del material observacional ha permitido arribar a las siguientes conclusiones:

(1) Los criterios fotométricos de selección de miembros tardíos resultan eficientes y confiables. Una comparación con las probabilidades de pertenencia asignadas a partir de los movimientos propios en NGC 3532 (King 1978) y NGC 6494 (Sanders y Schröder 1980) demuestra que los datos fotométricos y astrométricos conducen a resultados enteramente consistentes.

(2) Determinaciones de anomalías de cianógeno, excesos ultravioletas, y otros parámetros de abundancia, indican que cada cúmulo por separado es químicamente homogéneo. Las abundancias medias obtenidas oscilan entre -0.2 y +0.2 y ningún cúmulo parece tener sobreabundancia de elementos del grupo CNO.

(3) Las observaciones demuestran que las gigantes rojas en al menos 4 de los 5 cúmulos examinados pueden haber perdido parte de su masa antes de alcanzar la etapa de combustión del helio del núcleo estelar.

(4) Las gigantes rojas de los cúmulos NGC 3532, 4349, 6281 y 6494 definen razonablemente bien una única isócrona empírica en el diagrama Log L/Log Te correspondiente a una edad de aproximadamente 240 millones de años (ver Fig. 2). Si bien estas estrellas se disponen sobre una secuencia paralela a las trayectorias evolutivas teóricas, todas ellas aparentan tener temperaturas ligeramente superiores a las predichas por la teoría. Este efecto puede deberse a pequeños errores en las escalas de temperaturas de las calibraciones usadas, o bien de las calculadas teóricamente.

Los autores agradecen a las autoridades de los Observatorios de Cerro Tololo y Las Campanas por el tiempo de telescopio asignado. Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el CONICET y CONICOR de Argentina.

REFERENCIAS

- Becker, S.A. 1981, Ap. J. Suppl. 45, 475.
 Cannon, R.D. 1970, M.N.R.A.S. 150, 111.
 Clariá, J.J. 1979, Ap. Space Sci. 66, 201.
 Clariá, J.J. 1985, Astron. Astrophys. Suppl. 59, 195.
 Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1983, J. Astrophys. Astron. 4, 117.
 Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1986, Ap. J. 302, 656.
 Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1988, M.N.R.A.S. 235, 1129.
 Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1989 (en prensa).
 Clariá, J.J., Lapasset, E. y Minniti, D. 1989, Astron. Astrophys. Suppl. 78, 363.
 Clariá, J.J. y Minniti, D. 1988, The Observatory 108, 218.
 Crawford, D.L. y Mandwewala, N. 1976, Publ. Astron. Soc. Pacific 88, 917.
 Dawson, D.W. 1978, Astron. J. 83, 1424.
 FitzGerald, M.P. 1970, Astron. Astrophys. 4, 234.
 Faulkner, D.J. y Cannon, R.D. 1973, Ap. J. 180, 435.
 Janes, K.A. 1977, Publ. Astron. Soc. Pacific 89, 576.
 Janes, K.A. 1979, Ap. J. Suppl. 39, 135.
 King, D.S. 1978, Sydney Observatory Papers No. 79.
 Mermilliod, J.C. 1981, Astron. Astrophys. 97, 235.
 Osborn, W. 1973, Ap. J. 186, 725.
 Osborn, W. y Clariá, J.J. 1976, in IAU Symp. No. 72, p. 101, Eds. B. Hauck y P. C. Keenan, Reidel Publ. Co.
 Sanders, W.L. y Schröder, R. 1980, Astron. Astrophys. 88, 102.
 Schlesinger, B.M. 1969, Ap. J. 157, 533.

J.J.Clariá y E.Lapasset: Observatorio Astronómico de Córdoba, Laprida 854,
 5000 Córdoba, Argentina.

D.Minniti: Steward Observatory, University of Arizona, AZ 85721, U.S.A.