

METALICIDAD Y PERDIDA DE MASA EN GIGANTES ROJAS DE  
NGC 2539 Y NGC 4349

J.J. Clariá\* y E. Lapasset\*\*

Observatorio Astronómico de Córdoba

RESUMEN: Se presentan resultados obtenidos en los Observatorios de Cerro Tololo y Las Campanas a partir de fotometría multicolor de las ramas gigantes de los cúmulos abiertos NGC 2539 y NGC 4349. Si bien la información fotoeléctrica proveniente de la región roja del espectro conduce a metalicidades enteramente similares para ambos cúmulos, los índices de contaminación demuestran que la rama gigante de NGC 2539 posee, en promedio, sobreabundancia de elementos del grupo CNO con relación a NGC 4349. Un análisis de los parámetros atmosféricos derivados juntamente con resultados provenientes de modelos teóricos permite discutir efectos de pérdida de masa en la rama gigante de ambos agregados.

---

\* Astrónomo visitante del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo, operado por AURA, Inc. Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET de Argentina.

\*\* Astrónomo Visitante del Observatorio de Las Campanas, dependiente de la Universidad de Toronto (Canadá).

Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET de Argentina.

## I. INTRODUCCION

Como es bien sabido, la evolución de las estrellas sobre la secuencia principal se conoce relativamente bien. En efecto, no sólo existen en la actualidad una gran variedad de modelos teóricos que predicen la historia evolutiva para estrellas de distintas masas, edades y composiciones químicas, sino que además dichos modelos han podido ser comparados con datos observacionales de alta precisión. Por el contrario, es todavía relativamente incipiente nuestro conocimiento acerca de la fase de gigante roja para masas superiores a una masa solar. Si bien disponemos hoy en día de isócranas teóricas para esta fase de la historia evolutiva de las estrellas, lo que falta básicamente son datos observacionales suficientemente precisos y numerosos, a partir de los cuales puedan determinarse parámetros físicos fundamentales, que permiten efectuar comparaciones significativas con las predicciones de los modelos teóricos.

En este sentido, el trabajo más completo hasta la fecha ha sido realizado por Mermilliod (1981a) y Maeder y Mermilliod (1981). Entre los parámetros de interés aun faltantes, debemos quizá mencionar las temperaturas efectivas, gravedades superficiales, las composiciones químicas, y muy especialmente en virtud de su escasez, las masas de las estrellas rojas de alta luminosidad.

Es evidente que los cúmulos abiertos constituyen los mejores candidatos para efectuar las comparaciones a las que hacemos referencia. Lamentablemente, sólo unos pocos de ellos contienen un número apreciable de gigantes rojas. En particular, para estudiar la fase de gigante roja para masas mayores que aproximadamente 2 masas solares, debemos examinar cúmulos más jóvenes que las Hyades ( $\sim 6 \times 10^8$  años),

los que por lo general contienen un número muy reducido de gigantes rojas. Siguiendo a Mermilliod (1981a), parecería entonces que lo más adecuado sería considerar un conjunto de secuencias empíricas, formadas mediante la superposición de ramas gigantes de cúmulos con iguales edades y metalicidades, y compararlas con las correspondientes isócranas teóricas.

Este es sin dudas el objetivo final que intentaremos alcanzar en un futuro cercano. Por el momento, nos encontramos en la etapa previa de determinar las propiedades fundamentales de las ramas gigantes de cúmulos individuales.

NGC 2539 y NGC 4349 son dos cúmulos abiertos moderadamente concentrados cuyos diagramas HR sugieren edades aproximadamente similares a las Hyades y Praesepe (Mermilliod 1981a). Estudios fotométricos de Pesch (1961) y Lohmann (1961) ubican estos agregados a 1.3 y 1.7 kpc del sol en las constelaciones de Pupis y Crux, respectivamente, habiéndose estimado la absorción interestelar en 0.3 y 1.0 magnitudes, con sospechas de enrojecimiento diferencial en NGC 4349.

## 2. MATERIAL OBSERVACIONAL

Un total de 20 estrellas de tipos G y K ubicadas en la vecindad de NGC 2539 y NGC 4349 fueron observadas fotoeléctricamente desde el Observatorio Inter-Americano de Cerro Tololo. Las observaciones fueron realizadas con el telescopio de 91 cm en los sistemas DDO y CMT<sub>1</sub>T<sub>2</sub> desarrollados por McClure (1976) y Canterna (1976), respectivamente. Observaciones DDO realizadas por Dawson (1978) en NGC 4349 muestran un excelente acuerdo con las presentes mediciones. Las estrellas de NGC 4349 fueron también observadas fotoeléctricamente en el sistema UBV, no así en cambio las de NGC 2539 por registrar observaciones

fotoeléctricas previas (Pesch 1961). Las mediciones UBV fueron parcialmente realizadas usando el telescopio canadiense de 60 cm del Observatorio David Dunlap, ubicado en el Observatorio de Las Campanas (Chile). Sólo presentaremos aquí las principales conclusiones alcanzadas a partir del análisis de los datos recopilados. Las observaciones individuales UBV, DDO y  $CMT_1T_2$  en ambos cúmulos, juntamente con un análisis de tallado de las mismas, puede verse en otros trabajos (Clariá y Lapasset 1985a, 1985b).

### 3. GIGANTES ROJAS Y ESTRELLAS DE CAMPO

Como resultado de aplicar dos criterios independientes descriptos en trabajos anteriores (Clariá y Lapasset 1983, Clariá 1985), 6 de las 13 estrellas medidas en NGC 2539 resultan ser muy probablemente objetos del campo galáctico, en tanto que para las 7 restantes los criterios mencionados indican una probabilidad muy alta de vinculación física al cúmulo. Estos resultados se sintetizan en la última columna de la Tabla 1, en la cual se muestra también el enrojecimiento interestelar obtenido individualmente a partir del método de Janes (1977), su correspondiente desviación standard, la luminosidad predicha para la estrella en caso de que fuera miembro, el tipo espectral MK inferido de los índices DDO, y los resultados que se obtienen al aplicar los dos criterios, denotados A y B, separadamente. Las diferencias más evidentes entre miembros físicos y estrellas del campo se aprecian al comparar los excesos  $E(B-V)_{GK}$  individuales. El enrojecimiento medio resultante de las gigantes rojas de NGC 2539 es  $\langle E(B-V) \rangle = 0.^m08 \pm 0.^m02$ . Este valor está de buen acuerdo con el derivado por Pesch ( $E(B-V) = 0.^m10$ ) a partir de las estrellas de la secuencia principal.

TABLA 1

SEPARACION DE GIGANTES ROJAS Y ESTRELLAS DE CAMPO A PARTIR DE CRITERIOS FOTOMETRICOS.  
 LOS NUMEROS DE LAS ESTRELLAS FUERON ASIGNADOS POR PESCH (1961) Y LOHMANN (1961)  
 EN NGC 2539 Y NGC 4349, RESPECTIVAMENTE.

ESTRELLA	E(B-V) <sub>GK</sub>	$\sigma$ E	CL (predicha)	MK(DDO)	Criterios		Clasificación
					(A)	(B)	
NGC 2539 (Pesch 1961)							
6	0.08	0.04	II-III	68111	a	a	a
21	0.09	0.04	II-III	K2/3111	a	a	a
26	0.05	0.04	II-III	69111	pa	a	a
28	0.08	0.04	III	68111	a	a	a
32	0.10	0.04	II-III	65/811-III	a	a	a
42	0.10	0.05	III	681V	a	pa	a
51	0.04	0.04	III	65/8111	pa	a	a
7	0.00	0.04	III	K2/31V	na	pa	na
15	0.17	0.03	III	K4/5111	na	a	na
16	0.03	0.03	III	K4111	na	a	na
22	0.00	0.04	III	K2/3111	na	a	na
29	0.00	0.04	III	K4/5111	na	a	na
47	0.25	0.05	II-III	K41V	na	na	na
NGC 4349 (Lohmann 1961)							
5	0.34	0.05	II-III	69111	a	a	a
9	0.36	0.05	II-III	6811-III	a	a	a
127	0.37	0.04	II	K111	a	a	a
168	0.34	0.06	II-III	69111	a	a	a
174	0.38	0.05	II-III	K1111	a	a	a
203	0.36	0.04	II-III	6511-1b	a	a	a
185	0.45	0.05	II-III	65/811	na	pa	na

En NGC 4349 sólo una estrella con un exceso de color que difiere en más de  $2\sigma$  del valor medio resulta no miembro, mientras que las 6 restantes verifican sin ambigüedad los dos criterios antes mencionados. Cabe destacar que los enrojecimientos obtenidos no sólo presentan un excelente acuerdo con el valor  $E(B-V) = 0.33$  derivado por Lohmann (1961) a partir de las estrellas de la secuencia principal, sino que además permiten dejar de lado las sospechas de enrojecimiento diferencial en la región del cúmulo.

#### 4. ABUNDANCIA METALICA

Para determinar la abundancia metálica superficial de las ramas gigantes de ambos cúmulos, hicimos uso de la

información fotoeléctrica recogida tanto de la región violeta del espectro, como de una región próxima al rojo. Esto se debe a que los parámetros de abundancia de estrellas G y K provenientes de la región azul-violeta del espectro reflejan no sólo el efecto blanketing metálico, debido principalmente al hierro o elementos de su familia, sino que además reflejan la presencia de bandas moleculares de CN y CH. En consecuencia, la comparación de parámetros de abundancia provenientes de estas dos porciones del espectro debería permitir detectar sobreabundancia o subabundancias de compuestos moleculares que incluyan elementos del grupo CNO principalmente.

Para cada estrella del programa determinamos tres parámetros de abundancia, dos de ellos correspondientes al sistema de Washington y el tercero al sistema DDO, a saber:

$\Delta$  (C-M),  $\Delta$  (M-T<sub>1</sub>) y  $\delta$  CN (Canterna y Harris 1979; Janes 1975). Estos parámetros permitieron derivar para cada estrella las razones hierro e hidrógeno denotadas  $(Fe/H)_{CM}$ ,  $(Fe/H)_{MT}$  y  $(Fe/H)_{DDO}$ , respectivamente. El procedimiento seguido para calcular estas metalicidades es similar al descrito por Clariá y Lapasset (1985c).

Puesto que los índices C(41-42) y (C-M) recogen información de regiones espectrales aproximadamente similares, deberían conducir a resultados bastante similares. Es decir, las razones  $(Fe/H)_{CM}$  y  $(Fe/H)_{DDO}$  de una determinada estrella deberían ser muy parecidas. Si ésto ocurre a su vez con la razón  $(Fe/H)_{MT}$ , adoptamos para esa estrella el promedio de las tres determinaciones de abundancia. Si, por el contrario, la diferencia  $\Delta F = |(Fe/H)_{MT} - (Fe/H)_{CM}|$  es mayor o igual que 0.4, interpretamos ese resultado como debido a una sobreabundancia de elementos del grupo CNO en la atmósfera considerada.

Los resultados obtenidos en NGC 2539 y NGC 4349 se ilustran en la Tabla 2. Puede apreciarse que las gigantes rojas de NGC 2539 presentan razones  $(Fe/H)_{MT}$  sistemáticamente más bajas que  $(Fe/H)_{CM}$ , mientras que ello sólo ocurre en dos estrellas de NGC 4349. Si bien las metalicidades medias provenientes de la región roja del espectro conducen a metalicidades enteramente similares para los dos cúmulos y no muy diferentes del valor solar, los índices  $\Delta F$  sugieren que, en promedio, las estrellas de la rama gigante de NGC 2539 poseen una sobreabundancia de elementos del grupo CNO con relación a estrellas de la rama gigante de NGC 4349. Por otra parte, y tal como deberíamos esperar, la abundancia metálica inferida del sistema DDO es prácticamente la misma que la obtenida a partir del índice (C-M) del sistema de Washington en ambos cúmulos.

TABLA 2

METALICIDADES Y MASAS DE GIGANTES ROJAS DE NGC 2539 Y NGC 4349

Estrella	$(Fe/H)_{MT}$	$(Fe/H)_{CM}$	$(Fe/H)_{DDO}$	$m/m_{\odot}$
NGC 2539				
6	-0.1	0.3	0.17	1.2
21	-0.2	0.5	0.16	1.1
26	-0.3	-0.1	0.22	1.1
28	-0.2	0.2	0.14	1.5
32	0.1	0.4	0.50	1.7
42	-0.1	0.3	0.36	-
51	-0.3	-0.3	0.11	1.3
NGC 4349				
5	-0.2	-0.2	-0.17	1.2
9	-0.1	-0.2	-0.07	0.7
127	-0.1	0.4	-0.04	1.9
168	-0.3	-0.3	-0.02	0.9
174	-0.1	0.4	0.22	0.8
203	-0.3	-0.3	0.03	1.6

5. PERDIDA DE MASA DE GIGANTES ROJAS

Trabajos previos de Osborn (1971, 1973) y Osborn y Clariá (1976) han permitido calibrar los índices  $C_0(42-45)$  y

$C_o(45-48)$  en función de gravedades superficiales ( $g$ ) y temperaturas efectivas ( $T_e$ ) de estrellas G y K de composición solar. Conocida la metalicidad de una estrella, los índices DDO pueden ser corregidos por efecto blanketing, usando relaciones del siguiente tipo:

$$C(45-48)_{\text{normal}} = C_o(45-48) - \alpha(L) \text{ Fe/H} ,$$

$$C(42-45)_{\text{normal}} = C_o(42-45) - \beta(L) \text{ Fe/H} ,$$

en las cuales  $\alpha(L)$  y  $\beta(L)$  son funciones conocidas de la clase de luminosidad (Osborn 1979). Si además de los parámetros atmosféricos  $g$  y  $T_e$  de una gigante roja, se conoce el módulo de distancia del cúmulo, es posible entonces estimar la masa de la estrella usando la fórmula (13) de Clariá y Lasset (1983), previa determinación de la corrección bolométrica y de la magnitud absoluta bolométrica.

En la última columna de la Tabla 2 se muestran las masas obtenidas para las estrellas de ambos cúmulos. De acuerdo a las isócronas teóricas de Maeder y Mermilliod (1981), las masas de las gigantes rojas deberían ser mayores o iguales que  $2.3 \mathcal{M}_\odot$  en NGC 2539 y  $2.6 \mathcal{M}_\odot$  en NGC 4349, para ser consistentes con las edades de los respectivos agregados. Dichas edades fueron estimadas en 400 y 600 millones de años, respectivamente, usando el método descrito por Mermilliod (1981b). Contrariamente a lo esperado, sin embargo, las masas individuales derivadas en ambos cúmulos resultan ser  sistemáticamente  más pequeñas que las predichas teóricamente, siendo sus promedios 1.3 y 1.2 masas solares, respectivamente.

En verdad, la posibilidad de que las gigantes rojas de NGC 4349 hayan sufrido efectos de pérdida de masa ha sido antes mencionada por Dawson (1978).

Concientes de la fragilidad del método usado para estimar las masas de las gigantes rojas, pensamos que nuestros resultados podrían quizás deberse a imprecisiones en las observaciones o tal vez a una pobre determinación de alguna o 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) conduce a una imprecisión de  $0.2$  en el  $\log g$ , o bien a masas imprecisas en un factor  $1.5$  aproximadamente, nos parece prácticamente imposible que nuestros errores medios del orden de  $0.008$  en dicho índice puedan ser los responsables de las pequeñas masas encontradas. Por otra parte, suponer que errores en los puntos ceros de las calibraciones usadas puedan conducir sistemáticamente a subestimar las masas, tampoco nos parece probable ya que el mismo procedimiento fue usado en M67 (Osborn 1974) y las masas inferidas concuerdan con determinaciones independientes. Por otra parte, si bien es cierto que una disminución en la razón  $[Fe/H]$  o un aumento en el enrojecimiento interestelar incrementaría las masas calculadas, estas dos posibilidades también las descartamos, porque: (1) para calcular las masas, hemos usado las metalicidades más bajas acá determinadas, esto es, las razones  $[Fe/H]_{MT}$ ; (2) el enrojecimiento medio obtenido es muy similar al encontrado en ambos cúmulos por otros autores (Pesch 1961; Becker y Fenkart 1971; Lohmann 1961; Dawson 1978).

Restaría finalmente considerar el efecto que produce sobre las masas una imprecisión en la distancia. Cálculos sencillos, sin embargo, demuestran que habría que incrementar los módulos de distancia en más de una magnitud para obtener masas medias del orden de las predichas por los modelos teóricos.

En síntesis, los argumentos expuestos precedentemente nos conducen a aceptar que los presentes resultados representan una prueba adicional de que durante la fase de gigante roja las estrellas pierden efectivamente parte de su masa. Resultados similares han sido antes encontrados en varios cúmulos abiertos (Osborn 1974; Clariá 1979; Clariá y Lapasset 1983; Clariá 1985).

Los autores expresan su agradecimiento a los Dres. P. Osmer y R. Garrison por haberles permitido usar las facilidades de los Observatorios de Cerro Tololo y Las Campanas, respectivamente. Este trabajo ha sido parcialmente subsidiado por el CONICOR y el CONICET de Argentina.

#### REFERENCIAS

- Becker, W. y Fenkart, R. 1971, *Astron. Astrophys. Suppl.* **4**, 241.
- Canterna, R. 1976, *Astron. J.* **81**, 228.
- Canterna, R. y Harris, H.C. 1979, en "Problems of Calibration of Multicolor Photometric Systems" ed. A.G.D. Philip (Schnectady: Dudley Obs.), p. 199.
- Clariá, J.J. 1979, *Astrophys. Space Sci.* **66**, 201.
- Clariá, J.J. 1985, *Astron. Astrophys. Suppl.* **59**, 195.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1983, *Astrophys. & Astron.* **4**, 117.
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1985a, *Astrophys. J.* (en prensa)
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1985b (a publicar).
- Clariá, J.J. y Lapasset, E. 1985c, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* (en prensa).
- Dawson, D. 1978, *Astron. J.* **83**, 1424.
- Janes, K.A. 1975, *Astrophys. J. Suppl.* **29**, 161.
- Janes, K.A. 1977, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **89**, 576.

- Lohmann, A. 1961, *Astron. Nachr.* **286**, 105.
- Maeder, A. y Mermilliod, J.C. 1981, *Astron. & Astrophys.* **93**,  
136.
- McClure, R.D. 1976, *Astron. J.* **81**, 182.
- Mermilliod, J.C. 1981a, *Astron. Astrophys. Suppl.* **44**, 467.
- Mermilliod, J.C. 1981b, *Astron. Astrophys.* **97**, 235.
- Osborn, W. 1971, Tesis Doctoral, Yale University.
- Osborn, W. 1973, *Astrophys. J.* **186**, 725.
- Osborn, W. 1974, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **168**, 291.
- Osborn, W. 1979, en "Problems of Calibrations of Multicolor  
Photometric Systems", ed. A.G.D. Philip  
(Schnectady: Dudley Obs.), p. 83.
- Osborn, W. y Clariá, J.J. 1976, in IAU Symposium N<sup>o</sup> 72,  
"Abundance Effects in Classification", eds. B.  
Hauck y F.C. Keenan (Boston, Reidel), p. 101.
- Fesch, P. 1961, *Astrophys. J.* **134**, 602.