

ESTRUCTURA DEL DIAGRAMA H-R Y FUNCION DE LUMINOSIDAD DEL
CUMULO ABIERTO NGC 2547

J. J. CLARIA *

Observatorio Astronómico de Córdoba

* Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET y
Astrónomo Visitante del Observatorio Interamericano de Cerro
Tololo (Chile)

ABSTRACT:

Results from new UBV_B - DDO photometry as well as spectroscopic and kinematical data of stars in NGC 2547 are presented and discussed. Contrary to the result found by Fernie, the present photometry does not show any evidence of a cluster pre-main sequence. A minimum binary frequency of 58%, a mean distance of (450 ± 45) pc and other fundamental parameters are derived. A gap of $\Delta(B-V) \sim 0.08$ in the main sequence distribution of stars has been detected between spectral types A3 and A7. This gap, probably due to the abrupt onset of convection, is also observed in the photometric diagrams of several open clusters having ages nearly similar to that of NGC 2547. The luminosity function of the bright members agrees very well with that averaged over 62 clusters given by Taff.

1. INTRODUCCION

Hace algo más de dos décadas Fernie (1959) observó fotométricamente 66 estrellas de NGC 2547 en el sistema U_{CBV} . Un año después obtuvo movimientos propios absolutos de dichas estrellas sobre placas separadas en 62 años (Fernie 1960). A partir de estos trabajos Fernie observó que un número apreciable de estrellas F se ubicaban por encima de la secuencia principal en el diagrama color-magnitud (CM) e interpretó a las mismas como objetos en la etapa de contracción gravitatoria. Dicho autor notó, además, que una única estrella (CD-48°3535) presentaba las características de una típica gigante roja, aun cuando era tres magnitudes más débil que la estrella más brillante de la secuencia principal. Estas y otras consideraciones lo llevaron a pensar que NGC 2547 es un sistema solar muy joven. Sin embargo, contrariamente a lo que deberíamos esperar en un sistema de muy reciente formación, NGC 2547 no está asociado a ningún tipo de nebulosidad, ni contiene estrellas O, variables T Tauri, o incluso, estrellas B muy tempranas. Precisamente, fue ésta una de las razones principales por la que surgió nuestro interés en estudiar el sistema.

2. OBSERVACIONES FOTOMETRICAS

Nosotros observamos desde Bosque Alegre y Cerro Tololo un total de 118 estrellas en el sistema UBV. El acuerdo entre ambos observatorios es, en general, muy bueno para la magnitud y el color (B-V), no así, en cambio, para (U-B). En efecto, cuando los residuos (U-B) se grafican en función de (B-V) y por los puntos se hacen pasar rectas por mínimos cuadrados para diferentes intervalos de color, se obtienen las siguientes ecuaciones de transformación:

$$(U-B)_{\text{Tololo}} = (U-B)_{\text{Bosque}} - 0.012 - 0.302 (B-V)$$

$$(U-B)_{\text{Tololo}} = (U-B)_{\text{Bosque}} - 0.095 + 0.304 (B-V)$$

Las anteriores ecuaciones son válidas para los intervalos de color $-0.22 < (B-V) < 0.12$ y $0.60 > (B-V) > 0.12$, respectivamente, y pueden usarse en el futuro para lograr mejor acuerdo entre los índices (U-B) de Cerro Tololo y Bosque Alegre.

Además de las observaciones UBV, medimos fotoeléctricamente la intensidad de la línea H β en 23 estrellas tempranas y observamos la única posible gigante roja (CD-48°3535) en el sistema DDO. Con estos datos y algunos otros espectroscópicos y astronómicos ya existentes nos propusimos en esencia: 1) examinar la naturaleza real de la parte más baja de la secuencia principal, en particular, la supuesta existencia de una secuencia de estrellas en contracción; 2) determinar, con la mayor precisión posible, los parámetros fundamentales del sistema, tales como edad, distancia, composición, etc.; 3) estimar, al menos aproximadamente, el porcentaje de binarias y, finalmente, 4) determinar la función de luminosidad de los miembros más brillantes.

Presentaremos aquí sólo los principales resultados obtenidos con relación a NGC 2547. Las observaciones individuales UBV β - DDO, los errores medios involucrados y los datos espectroscópicos y astronómicos utilizados en este trabajo, pueden verse en una versión más completa y detallada del presente estudio (Clariá 1981).

3. ESTRUCTURA DEL DIAGRAMA H-R

En la Figura 1 se muestra el diagrama V versus (B-V) de NGC 2547, obtenido usando los nuevos datos fotoeléctricos. La línea llena es la secuencia principal de edad cero, ajustada a la distancia del objeto; la línea a trazos es la misma secuencia desplazada en 0^m.75 hacia arriba de manera de representar el límite de máxima dispersión por duplicidad; los círculos abiertos son estrellas del campo, los cerrados son miembros del cúmulo y los triángulos representan probables miembros. Las escalas del color (B-V)_c y M_v han sido ajustadas previa determinación de la absorción interestelar y del módulo de distancia.

El diagrama H-R presenta dos características particularmente interesantes. En primer lugar, se aprecia que la secuencia principal contiene estrellas B, A, F, e incluso G, la mayor parte de estas últimas identificadas por vez primera en este estudio. Dicha secuencia

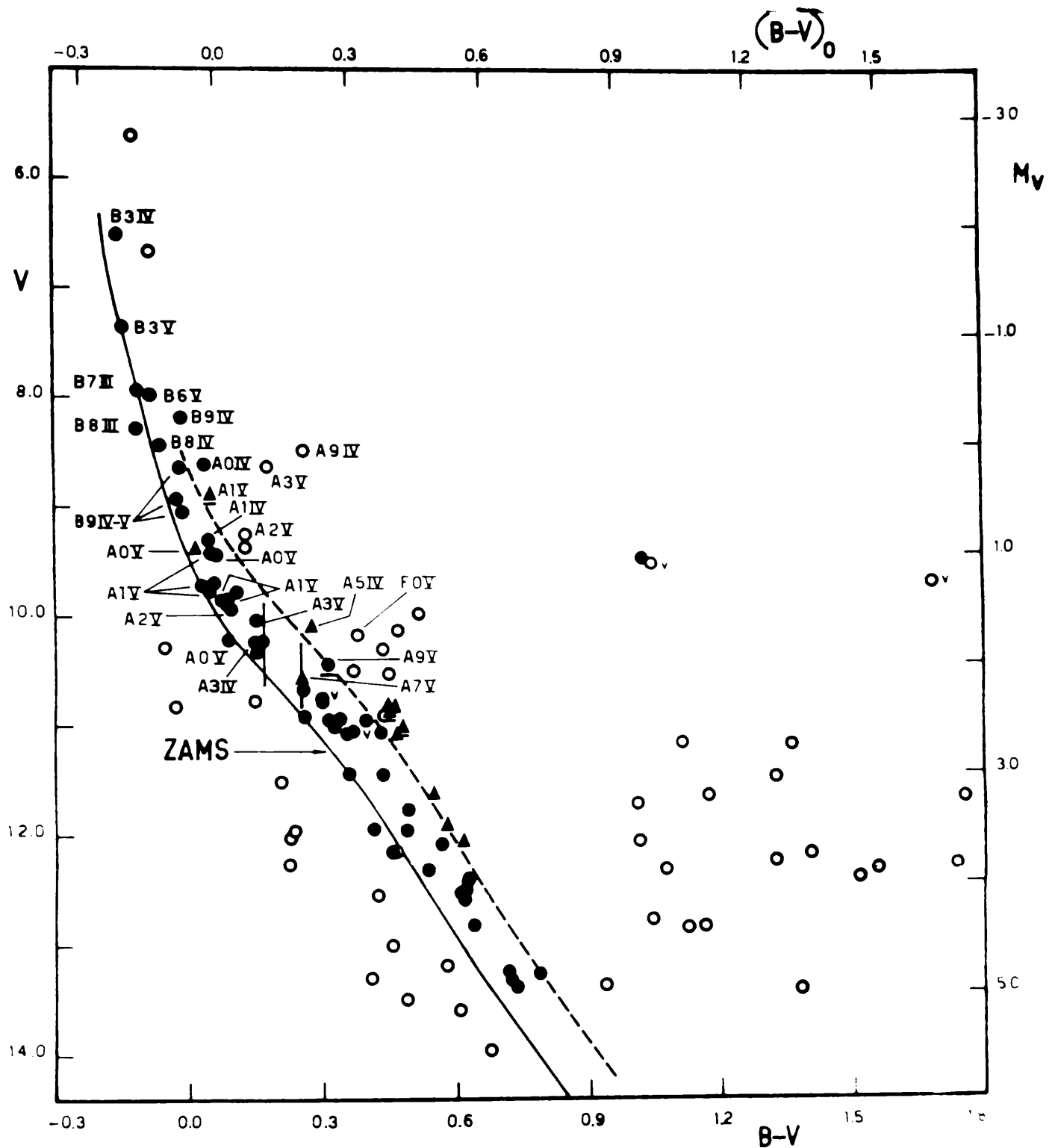


Figura 1: Diagrama H-R de NGC 2547. Los miembros, probables miembros y estrellas del campo, se representan por círculos llenos, triángulos y círculos abiertos, respectivamente. Las escalas de $(B-V)_0$ y M_v han sido ajustadas con $E(B-V) = 0.06$ y $V-M_v = 8.43$ (ver texto). La línea llena es la secuencia de edad cero ajustada a la distancia del cúmulo (450 pc), mientras que la línea a trazos representa la misma secuencia, desplazada en 0^m75 .

abarca entre 6 y 7 magnitudes y presenta una dispersión considerable. A esta dispersión contribuyen diversos factores, tales como duplicidad, rotación, presencia de estrellas peculiares, efectos de evolución, errores fotométricos, etc. Sin embargo, puede resultar de interés notar que los errores fotométricos son inusualmente pequeños, dada la calidad de los datos y, al mismo tiempo, ninguno de los espectros individuales en 110 Å/mm ha podido ser clasificado como objeto tipo Ap, Am, o en general, como estrella peculiar. Pensamos, en consecuencia, que la dispersión del diagrama debe estar relacionada principalmente con efectos de rotación y binaridad, particularmente éste último. De cualquier manera y contrariamente a lo sugerido por Fernie, nuestros datos no revelan la existencia de estrellas en la etapa de contracción gravitatoria. Esto parece ciertamente más coherente con la inexistencia de nebulosidades y estrellas muy tempranas.

En segundo lugar, es evidente que la estructura del diagrama H-R presenta una marcada discontinuidad en la distribución de estrellas de la secuencia principal, entre los tipos espectrales A3 y A7, aproximadamente. Este "gap" de 0.08 de amplitud, no puede ser explicado como un efecto de selección y representa, muy probablemente, una propiedad intrínseca del diagrama H-R de NGC 2547. Revisando cuidadosamente la bibliografía notamos que este "gap" se advierte también con claridad en varios cúmulos con edades muy semejantes a NGC 2547. Tal es el caso, por ejemplo, de Coma Berenices (Johnson y Knuckles 1955), Praesepe (Johnson y otros 1962), NGC 6025 (Kilambi 1975), NGC 2571 (Kilambi 1978), NGC 1039 (Canterna y otros 1979), e incluso las Pléyades (Johnson y Morgan 1953), aun cuando en este último caso la discontinuidad ocurre en un (B-V) algo mayor.

¿Cómo podríamos justificar la existencia de este "gap" observado? La respuesta a este interrogante podría quizás surgir de un trabajo de Bohm-Vitense (1958), quien llevó a cabo una serie de cálculos teóricos de regiones convectivas en todo tipo de estrellas. Dichos cálculos demostraron que, en la región de las estrellas A y F, podemos esperar una abrupta transición entre las condiciones de equilibrio radiativo (E.R.) y aquéllas en las cuales el transporte convectivo comienza a ser importante. Bohm-Vitense (1970) mostró además que el transporte convectivo en las estrellas A y F tiende a enrojecer la estrella. Esto significa que, a igualdad de temperatura efectiva, la atmósfera convectiva da lugar a un índice de color (B-V) mayor que la atmósfera radiativa. Así pues, si T_0 es la temperatura a partir de la cual la teoría predice una transición de equilibrio radiativo a transporte convectivo, entonces todas las estrellas con $T_e \geq T_0$ permanecerán en E.R., en tanto que aquéllas con $T_e < T_0$ comenzarán a transportar energía por convección. Si una estrella en E.R. con $T_e = T_0$ tiene un índice de color (B-V) = H, entonces cualquier otra estrella con una temperatura efectiva ligeramente menor que T_0 tendrá un color (B-V) = $H + \delta H$, siendo δH una cantidad positiva que representa el cambio de color debido a la convección. Si el pasaje de E.R. a transporte convectivo es efectivamente abrupto, no deberíamos encontrar estrellas con colores en el rango de color $H < (B-V) < H + \delta H$. En otras palabras si las predicciones teóricas antes mencionadas son correctas,

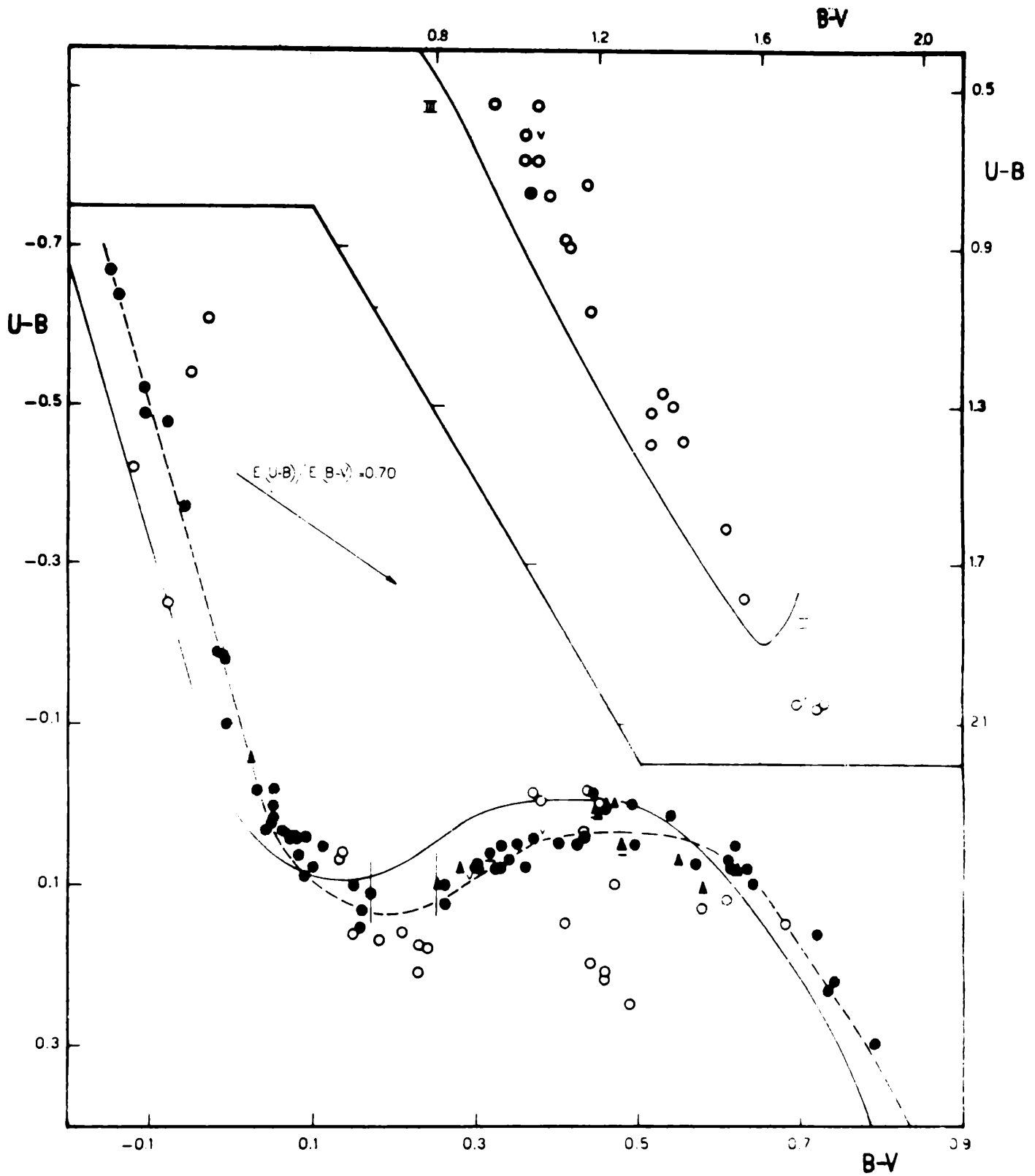


Figura 2: Diagrama a dos colores de NGC 2547, con notación similar a la de la Fig. 1. Las líneas llenas son las relaciones standard de Schmidt-Kaler (1965) para la secuencia principal (abajo e izquierda) y clase de luminosidad III (arriba y derecha). El "gap" entre A3 y A7 es claramente visible.

deberíamos esperar una marcada discontinuidad en la distribución de estrellas normales en las inmediaciones del color (B-V). La amplitud δH del intervalo H, $H + \delta H$ dependerá de la cantidad de energía transportada convectivamente. Si admitimos que la microturbulencia no varía al iniciarse el transporte convectivo y, para obtener el gradiente de temperatura, suponemos que es aplicable el método de ajuste de la distribución de temperatura solar, entonces la amplitud δH resulta 0.07, valor éste que coincide notablemente con el encontrado en NGC 2547 y en los otros cúmulos.

Por otra parte y tal como ya ha sido mostrado por Chandrasekhar (1957, 1961), la rotación estelar actúa inhibiendo la convección al punto que, en cierto intervalo de temperaturas efectivas, podríamos imaginar dos tipos de estrellas: 1) de alta rotación y en E.R., y 2) de baja rotación y con transporte de energía parcialmente convectivo. Esto explicaría el hecho observado en este trabajo de que la transición de E.R. a transporte convectivo en diferentes cúmulos, ocurre en general en temperaturas efectivas diferentes. Si la rotación efectivamente inhibe la convección, cúmulos con velocidades rotacionales altas, en promedio, deberían dar lugar a "gaps" ligeramente corridos hacia la derecha en el diagrama a dos colores. Es evidente que, en la medida que se dispongan de más y mejores datos fotométricos y espectroscópicos de estrellas A y F en cúmulos abiertos, mejorará nuestro conocimiento general de la estructura del diagrama H-R.

En la Figura 2 se presenta el diagrama a dos colores en el que se usó la misma notación que antes. Notamos inmediatamente la secuencia principal escasamente enrojecida y la discontinuidad estelar o "gap" claramente visible. No hay indicios de excesos o deficiencias ultravioletas muy grandes, en promedio, entre las estrellas F y G y, por lo tanto, el cúmulo debe tener una composición química aproximadamente similar a las gigantes de tipo G de la vecindad solar.

4. SELECCION DE MIEMBROS, PROBABLES MIEMBROS Y NO MIEMBROS

La Figura 3 representa un diagrama de los movimientos propios μ_α versus μ_δ , ambos en segundos de arco. Resulta evidente que existe una concentración de puntos en una cierta región del diagrama. El círculo representa una estimación aproximada del límite más allá del cual los movimientos propios son considerados demasiados grandes como para que representen miembros del cúmulo. Para que una estrella sea considerada miembro, requerimos como condición necesaria, pero no suficiente, que se ubique dentro del círculo de la Figura 3 (criterio astronómico).

En apretada síntesis podríamos decir que el proceso de selección de miembros se llevó a cabo cuidadosamente usando criterios astronómicos, fotométricos y espectroscópicos. Así pues, 58 estrellas resultaron finalmente miembros por satisfacer todos los criterios de selección, en tanto que 12 objetos, algunos de ellos conocidos sistemas binarios, fueron considerados probables miembros al verificar parcialmente los mencionados criterios. Detalles relativos a los criterios

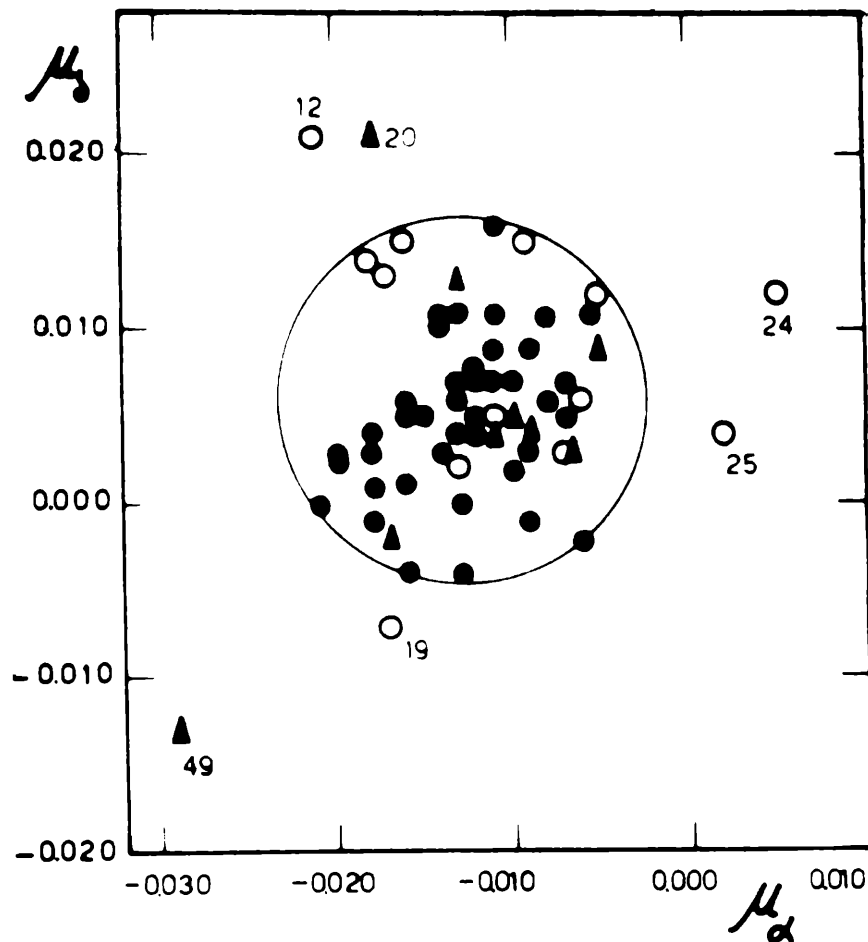


Figura 3: Movimientos propios absolutos μ_{δ} versus μ_{α} .

usados pueden verse en otro trabajo (Clariá 1981).

5. ANALISIS INDIVIDUAL DE CD-48°3535

CD-48°3535 es la única estrella roja que satisface el criterio astronómico. De la fotometría UB_V-DDO y el método de Janes (1977) se obtiene $E(B-V) = 0.06$, en excelente acuerdo con el valor obtenido a partir de los miembros azules de la secuencia principal (ver Sec. 6). De la curva de enrojecimiento de Schild (1977) inferimos las siguientes relaciones:

$$E(45 - 48) = 0.307 E(B-V) ,$$

$$E(42 - 45) = 0.233 E(B-V) ,$$

$$E(41 - 42) = 0.087 E(B-V) ,$$

de las cuales se obtienen los colores intrínsecos y, de éstos y las calibraciones existentes, encontramos que la estrella es una G9III con una anomalía de cianógeno $\delta CN = -0.013$ y $[Fe/H] = -0.1$. En consecuencia, si suponemos que el contenido metálico de CD-48°3535 es representativo de todo el cúmulo, el mismo resulta ser levemente menos metálico que las Hyades.

6. PARAMETROS FUNDAMENTALES

En la Tabla I se presentan las propiedades fundamentales de NGC 2547, reconocidas en el presente estudio. El enrojecimiento interesante se obtuvo: 1) a partir de las estrellas B, usando las ecuaciones de Clariá (1977); 2) a partir de los tipos MK, usando la calibración de Schmidt-Kaler (1965), y 3) de la fotometría UBV-DDO de CD-48°3535. El acuerdo entre estos tres valores es excelente. El módulo de distancia lo obtuvimos también por tres métodos enteramente independientes, a saber: 1) paralajes espectroscópicas, 2) fotometría en banda ancha y la calibración de Crawford (1973), y 3) fotometría en banda ancha y la calibración de Schmidt-Kaler (1965). El acuerdo entre los valores obtenidos es muy bueno y, en promedio, coincide también con el módulo obtenido a partir del procedimiento de ajuste de la secuencia principal de edad cero. La distancia de 450 pc finalmente obtenida, es algo mayor que la derivada por Fernie (1959) y exactamente la mitad de la estimada por Buscombe (1963).

7. PORCENTAJE DE BINARIAS Y FUNCION DE LUMINOSIDAD

Hemos visto (Figura 1) que la secuencia principal de NGC 2547 es relativamente larga e incluye un cierto número de estrellas débiles que, desde luego, puede aun ser mucho mayor. Estas características, de alguna manera se contraponen con las de NGC 2281 (Alcaino 1967), por ejemplo, aun cuando estos dos cúmulos no difieren mucho en edad. En general, las diferencias en las funciones de luminosidad de distintos cúmulos abiertos pueden provenir de diferentes condiciones físicas en la región donde se formaron las estrellas. Sin embargo, tal como han mostrado algunos trabajos teóricos las estrellas binarias desempeñan un papel relevante en la evolución dinámica de los cúmulos. En efecto, durante la vida de un agregado pueden ocurrir ciertos procesos dinámicos que conducen a una reducción de las estrellas de baja masa. La mayor o menor eficiencia de tales procesos depende fuertemente del porcentaje de binarias.

Dijimos en la Sección 3 que la presencia de binarias no resueltas en un cúmulo es una de las causas, probablemente la principal, que contribuye a la dispersión del diagrama H-R de dicho cúmulo. Otra causa es la elevada rotación de ciertas estrellas con respecto a la velocidad media del cúmulo. Si bien el límite máximo de dispersión por efectos de duplicidad es de 0.75^m (para una dada temperatura), una serie de trabajos teóricos parecen mostrar que el límite máximo de dispersión por efectos de rotación es del orden de 0.2^m o, a lo sumo 0.3^m (Strittmatter y Sargent 1966, Faulkner y otros 1968, Hardorp y Strittmatter 1968, Slettebak 1970, Maeder y Peytremann 1970, Maeder 1971). Por lo tanto, decidimos considerar como binaria fotométrica toda estrella ubicada entre 0.3 y 0.5, por encima de la secuencia principal. Un total de 40 estrellas resultaron binarias fotométricas, de las cuales 4 son conocidas estrellas dobles. Esto implica que, al menos el 58% de las estrellas de NGC 2547 deberían ser binarias. Este porcentaje podría incluso considerarse una cota inferior al valor

real, debido a que el método usado no incluye las binarias cuya razón de masa sea muy alta.

En la Figura 4 se muestra la función de luminosidad obtenida para NGC 2547 (línea llena). Los miembros y no miembros fueron incluidos con pesos 1 y 1/2, respectivamente. A manera de comparación hemos incluido en el diagrama la función de luminosidad obtenida por Taff (1974), en promedio, para 62 cúmulos abiertos y la función de luminosidad de las Pléyades (Johnson y Morgan 1953). Estas dos funciones fueron normalizadas de manera de que incluyan igual cantidad de miembros que NGC 2547 en el rango $M_V < 3.0$. Se aprecia que el número de estrellas por unidad de intervalo de magnitud en NGC 2547 alcanza el máximo aproximadamente en $M_V = 2.0$ y luego comienza a decrecer. Más allá de $M_V = 2.0$, sin embargo, puede haber efectos de selección de tipo observacional. Vemos también que, si bien la función de Taff y los dos histogramas presentan en general, buen acuerdo, la pendiente de la función de luminosidad observada en NGC 2547 es algo mayor que en las otras dos funciones. Finalmente, notamos que si bien las Pléyades

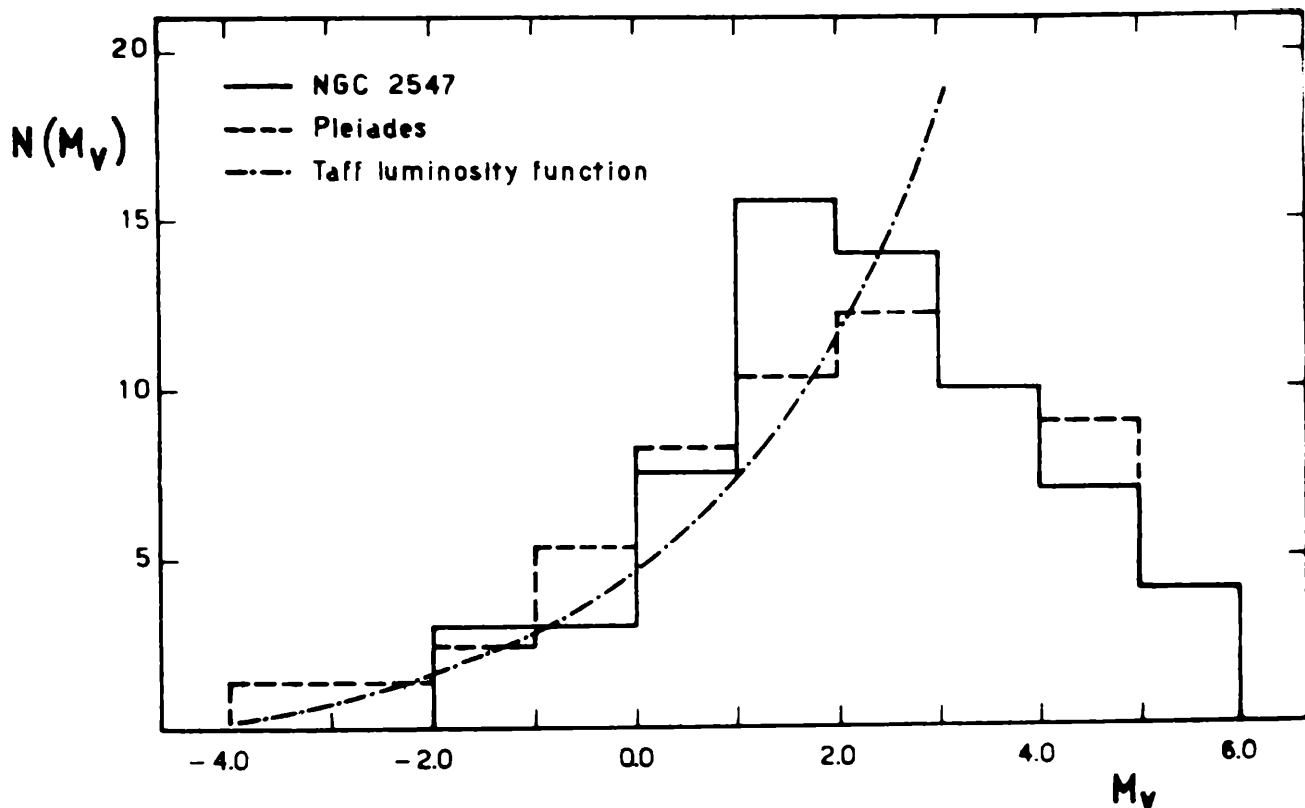


Figura 4: Función de luminosidad obtenida para NGC 2547 (histograma lleno). Como comparación, se muestran la función de luminosidad de las Pléyades y la obtenida en promedio por Taff (1974) para 62 cúmulos abiertos

aparentan tener más miembros brillantes que NGC 2547 -no obstante ser ligeramente más viejo- esta aparente contradicción puede estar relacionada con la considerable imprecisión de los parámetros del punto de desvío de la secuencia principal, a partir de los cuales determinamos la edad del cúmulo.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Director del Observatorio de Cerro Tololo por el tiempo de observación que le fue concedido en el verano de 1978. Expresa también su agradecimiento a los Sres. B. Candellero, J. R. Puerta, H. Moyano y J. Laborde, por la asistencia prestada durante las observaciones y la confección de los diagramas.

REFERENCIAS

- Alcaino, G. 1967, *Astrophys. J.* 147, 112.
Bohm-Vitense, E. 1958, *Astronomy & Astrophys.* 46, 108.
Bohm-Vitense, E. 1970, *Astronomy & Astrophys.* 8, 283.
Buscombe, W. 1963, *Mem. Mount Stromlo* N° 5.
Canterna, R.; Perry, C.L. y Crawford, D.L. 1979, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 91, 263.
Chandrasekhar, S. 1957, *Phil. Mag. Ser. A.*, 2, 845.
Chandrasekhar, S. 1961, *Hydrodynamics & Hydromagnetic Stability* (Oxford: Clarendon Press), p. 135.
Clariá, J.J. 1977, *Astronomy & Astrophys. Suppl.* 27, 145.
Clariá, J.J. 1981, *Astronomy & Astrophys. Suppl.* (en prensa).
Crawford, D.L. 1973, B. Hauck y B. Westerlund (eds.), *Problems of calibration of absolute magnitudes and temperatures of stars*, IAU Symp. 54, Reidel, Dordrecht, p. 93.
Faulkner, J.; Roxburg, I. y Strittmatter, P.A. 1968, *Astrophys. J.* 151, 203.
Ferne, J.D. 1959, *Monthly Notes R. Astron. Soc. Sth. Africa* 18, 57.
Ferne, J.D. 1960, *Monthly Notes R. Astron. Soc. Sth. Africa* 19, 120.
Hardorp, J. y Strittmatter, P.A. 1968, *Astrophys. J.* 151, 1057.
Johnson, H.L. y Knuckles, C.F. 1955, *Astrophys. J.* 122, 209.
Johnson, H.L.; Mitchell, R.I. e Iriarte, G. 1962, *Astrophys. J.* 136, 75.
Johnson, H.L. y Morgan, W.W. 1953, *Astrophys. J.* 117, 313.
Kilambi, G. 1975, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 87, 975.
Kilambi, G. 1978, *Publ. Astron. Soc. Pacific* 90, 721.
Maeder, A. 1971, *Astronomy & Astrophys.* 10, 354.
Maeder, A. y Peytremann, E. 1970, *Astronomy & Astrophys.* 7, 120.
Schild, R.E. 1977, *Astron. J.* 82, 337.
Schmidt-Kaler, Th. 1965, *Landolt-Bornstein, Numerical data and functional relationships in Science and Technology, Group VI, I*, Springer-Verlag, Berlin, p. 302.
Slettebak, A. 1970, *Stellar rotation*, D. Reidel, Dordrecht.
Strittmatter, P.A. y Sargent, W.L. 1966, *Astrophys. J.* 145, 130.
Taff, L.G. 1974, *Astron. J.* 79, 1280.

TABLA I

Parámetros fundamentales de NGC 2547 obtenidos en el presente estudio

Posición	$\alpha = 8^h 09^m 12^s$, $\delta = -49^\circ 07'$ $l = 264^\circ 5'$, $b = -8^\circ 6'$			
Enrojecimiento . . .	$E(B-V) = 0.06 \pm 0.02$ $E(U-B) = 0.04 \pm 0.02$	$E(B-V)_{UBV} = 0.06 \pm 0.02$ $E(B-V)_{MK} = 0.06 \pm 0.02$ $E(B-V)_{DDO} = 0.06$		
Absorción visual . .	$A_V = 0.18$			
Módulo verdadero de distancia	$V_0 - M_V = 8.25 \pm 0.22$		paralajes espectroscópicas ± 8.34 fotometría H β ± 8.23 fotometría UBV ± 8.18 ajuste sec. ppal ± 8.30	± 0.10 ± 0.09 ± 0.08 ± 0.15
Distancia lineal . .	$d = (450 \pm 45)$ pc			
Distancia al plano galáctico	$z = -68$ pc			
Diámetro angular	$D = 1^\circ 14'$			
Diámetro lineal . .	$\delta = 8.7$ pc.			
Edad	$\tau = 5.5 - 7.5 \times 10^7$ años			
Número de miembros	$N(m) \geq 58$			
Número de probables miembros	$N(pm) = 12$			
Número de gigantes rojas	$N(GR) = 1$			
Número de variables	$N(v) = 2$			
Propiedades cinemáticas	$\langle V \rangle$: velocidad radial media = 15.4 km seg^{-1} $\mu_{\alpha, \delta}$: movimientos propios medios = $-0''.013$; $+0''.005$ U, V, W : componentes de veloc. espacial = 20, -12, -10			

TABLA I (continuación)

Propiedades integradas . . .	η_{T}	: masa total	$\geq 155 \text{ } \eta_{\odot}$
	δ_{T}	: densidad media espacial	$\geq 0.45 \text{ } \eta_{\odot} \text{ pc}^{-3}$
	V_{O}^{T}	: magnitud visual aparente integrada = 4.80	
	$(\text{B-V})_{\text{O}}^{\text{T}}$: color intrínseco (B-V) _O integrado = -0.09	
	$(\text{U-B})_{\text{O}}^{\text{T}}$: color intrínseco (U-B) _O integrado = -0.44	