

Composición química fotosférica en la estrella HD 214714 con débiles bandas de cianógeno (CN)

*Ramón Molina**

*Laboratorio de Investigación en Física Aplicada y Computacional,
Universidad Nacional Experimental del Táchira. Venezuela.*

Recibido: 05-11-12 Aceptado: 12-11 13

Resumen

Se analizan las abundancias químicas fotosféricas de 26 elementos identificados en la estrella HD 214714, clasificada como una estrella doble con bandas intensas de CH y de baja velocidad espacial. Para el análisis se emplea un espectro de alta resolución (~ 42500). El espectro estelar fue reducido utilizando el software IRAF. Los parámetros atmosféricos temperatura efectiva, gravedad superficial y velocidad de microturbulencia y las abundancias químicas fotosféricas de la mayoría de los elementos (Li, CNO, del proceso- α y de los procesos s y r) son estimados por medio de la versión actualizada del código MOOG, desarrollado bajo ETL (1). Se emplean los modelos atmosféricos bajo ETL, geometría plana-paralela y equilibrio hidrostático (2). Los parámetros atmosféricos estimados para la estrella son: $T_{\text{eff}}=5500\pm 250\text{K}$, $\log g=2.5\pm 0.5$ y $V_{\text{turb}}=2.0\pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$. Los resultados del análisis químico indican que la estrella es una gigante que pertenece al disco Galáctico delgado. El diagrama HR sugiere además que HD 214714 se encuentra evolucionando hacia la rama de las gigantes rojas.

Palabras clave: estrellas tardías, abundancias químicas, parámetros atmosféricos.

Photospheric chemical composition on HD 214714 with weak cyanogen bands (CN)

Abstract

We analyze the photospheric chemical abundances of 26 elements identified in the star HD 214714, classified as a double star with strong bands of CH. The analysis was carried out on a high resolution (~ 42500) spectrum. The atmospheric parameters effective temperature, surface gravity and microturbulence velocity and the photospheric chemical abundances of most elements (light Li, CNO, α - process and the s-and-r process) are estimated using the latest version of the code MOOG, developed under LTE assumptions (1). Atmospheric models are used in LTE, flat-parallel geometry and hydrostatic equilibrium calculated by (2). The estimated atmospheric physical parameters are: $T_{\text{eff}}=5500 \pm 250\text{K}$, $\log g=2.5 \pm 0.5$ and $V_{\text{turb}}= 2.0 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$. The chemical analysis results suggest that the star is a giant that belong to the thin galactic disk. The position of the star in the HR diagram also suggests that HD 214714 is evolving in the first crossing from the main sequence toward the Red Giant Branch.

Keywords: late stars, chemical abundances, atmospheric parameters.

* rmolina@unet.edu.ve

Introducción

Entre las estrellas gigantes con tipos espectrales G y K, existen un considerable número de ellas que poseen bandas de CN y/o CH con una “anormal” intensidad en sus respectivos espectros. Dentro de este conjunto de estrellas existe un grupo de objetos peculiares que tienen, en promedio, bandas de CN más débiles que aquellas estrellas gigantes comunes consideradas “normales”, y que tienen la misma temperatura y luminosidad. Estas estrellas están caracterizadas por poseer bandas débiles en la región violeta del espectro estelar. Varias de estas estrellas peculiares fueron reportadas por (3), en particular δ Lep y HD 81192. Debido a la presencia de débiles bandas de cianógeno en su espectro estelar, estas estrellas también fueron clasificadas con la etiqueta CN. En un estudio posterior, (4) mejoran la clasificación de este tipo de estrellas, concluyendo que muchos de estos objetos con etiquetas CN también llegan a ser pobres en metales. En este sentido le asignaron la etiqueta Fe, para indicar el grado en la metalicidad en esta clase de estrellas.

De observaciones realizadas posteriormente por (5) se estableció que el debilitamiento de las bandas de CN es más común entre las estrellas que tienen altas velocidades espaciales, por lo que esta condición parece ser, una de las características físicas que presentan algunas de las estrellas pertenecientes a la Población tipo II de la Galaxia. Sin embargo, no está claro como esta deficiencia en el CN se pudiera correlacionar con otros rasgos sugeridos para objetos de la Población II, como por ejemplo, el debilitamiento general de las líneas de metales. Estudios más recientes sobre las peculiaridades observadas en el debilitamiento o fortalecimiento de las bandas de CN en cúmulos globulares, parecen revelar que dichas características son consideradas trazadoras útiles en las inhomogeneidades de las abundancias presentes en los distintos grupos globulares de nuestra Vía Láctea (6).

De acuerdo con el trabajo de (7), la determinación de las abundancias químicas en las estrellas con bandas débiles de CN muestran un marcado interés por dos razones: la primera, se sospechaba que este tipo de estrellas son pobres en metales, tal que si este razonamiento fuese el correcto, la composición química de estos objetos podría ayudar a definir las abundancias relativas de sus elementos durante la fase temprana de la evolución en el disco galáctico. En segundo lugar, si estas estrellas tuvieran metalicidades del tipo solar, esto es $[Fe/H] = 0$, entonces una deficiencia en el CN sugiere un proceso de evolución distinto al proceso de evolución estándar. Por esta razón, el estudio de estas estrellas es de un interés potencial desde el punto de vista de la evolución estelar como también de la evolución química de la Galaxia.

En este trabajo se estudian las abundancias químicas fotosféricas de la estrella HD 214714 empleando para este propósito un espectro óptico de alta resolución. Esta estrella ha sido clasificada con un tipo espectral y una luminosidad G3 Ib-II: CN-1 CH2 Fe-1 de acuerdo a la reclasificación hecha por (8) para este tipo de objetos. Además, esta estrella fue identificada por Bidelman como una estrella con fuertes bandas de CH y de baja velocidad espacial. Por otra parte, (9) catalogaron a esta estrella con fuertes bandas de CH y C_2 . La estrella HD 214714 al igual que la estrella HR 7606 consideradas estrellas de CH de baja velocidad son medianamente deficientes en metales y difieren de las estrellas clásicas gigantes rojas con CH que se encuentran en el halo de la Galaxia y poseen metalicidades $[Fe/H] \leq -1.0$. Las estrellas de CH de baja velocidad espacial pertenecen a la población del disco galáctico, las cuales parecen tener mayores masas que las estrellas clásicas gigantes rojas con CH.

Un análisis previo de las abundancias químicas de los elementos ligeros, elementos alfa, elementos del pico de hierro y elementos del proceso lento de captura de neutrones fueron realizados por (7, 9). Estos auto-

res encuentran que el Li I está enriquecido significativamente y que no existe un exceso sustancial de los elementos del proceso lento [s/Fe] con respecto al hierro. Finalmente (7, 9) concluyen que las estrellas con una fuerte banda de CH evolucionan, por primera vez, hacia la derecha desde la secuencia principal (SP) y la rama de las gigantes (RGB) en el diagrama HR (DHR), encontrándose específicamente en la región denominada la brecha Herzsprung. Nuestro interés en el estudio de esta estrella consiste en reafirmar las abundancias químicas y el estado evolutivo de la estrella HD 214714, utilizando para este propósito, un espectro estelar con un mejor poder de resolución que aquellos analizados previamente.

Observación y reducción

El espectro de la estrella HD 214714 fue observado el día 7 de Julio de 1999 por el Dr. Armando Arellano con el espectrógrafo Echelle ELODIE instalado en el telescopio de 1.93 m en el Observatorio Haute-Provence (Francia) cuyo poder de resolución se encuentra en el orden de 42500 (10). El rango de longitud de onda del espectro abarca desde 3900 Å hasta 6800 Å divididos en 67 ordenes echelle con algunas superposiciones entre ordenes adyacentes. El espectro fue reducido y normalizado al continuo empleando la rutina astronómica IRAF. Los anchos equivalentes (*EW*) fueron medidos utilizando la tarea SPLOT del IRAF utilizando un ajuste gaussiano. La precisión alcanzada en la medición de los *EW* puede alcanzar 10%. Se evita medir los *EW* de las líneas mezcladas y la magnitud de estos debe encontrarse entre 10 mÅ y 200 mÅ. La razón de esta restricción obedece a que los *EW* por debajo de 10 mÅ pueden confundirse con el ruido

y los *EW* por encima de los 200 mÅ están afectados por no equilibrio termodinámico local (NETL). Se mide la velocidad radial heliocéntrica (*RV*) para la estrella usando el corrimiento Doppler sobre las líneas de absorción. Se emplea un total de 113 líneas identificadas y se obtiene un valor para este parámetro de $-5.8 \pm 0.3 \text{ km s}^{-1}$. Este valor ha sido comparado con valores de *RV* obtenidos previamente por otros autores $-6.5, -7.7 \pm 0.3, -6.8, -6.8, -6.4 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1}$ (11-15). Se puede observar que la variación de la *RV* es muy pequeña para las distintas épocas, lo cual la hace prácticamente constante. En la tabla 1 se pueden observar las propiedades básicas de la estrella en estudio en las que se incluyen el tipo espectral, la magnitud visual aparente, las coordenadas ecuatoriales y galácticas, la paralaje y la rotación.

Metodología

Estimación de los parámetros atmosféricos

Antes de comenzar a derivar las abundancias químicas de la estrella HD 214714, se hace necesario estimar los parámetros atmosféricos tales como; la temperatura efectiva, la gravedad superficial y la velocidad de microturbulencia con el fin de conocer con gran aproximación la estructura real de su atmósfera. Se emplea dos métodos para su estimación; uno fotométrico y el otro espectroscópico.

Método fotométrico

Una primera aproximación de la temperatura efectiva de la estrella se obtiene a partir de la fotometría de Johnson *UBV*

Tabla1
Propiedades básicas de HD 214714

T. Esp.	V (mag)	$\alpha(2000.0)$ (h m s)	$\delta(2000.0)$ (° ' ")	l (°)	b (°)	$\pi \pm \Delta\pi$ (mas)	vsini (km s ⁻¹)
G3 Ib-IIb	6,865	22 39 34.3	37 35 34.1	95,92	-18,26	3,27±0,37	10

haciendo uso de los datos fotométricos de los filtros *BV* disponibles en la base de datos SIMBAD. Se emplea la ecuación 4 de las calibraciones empíricas color-temperatura derivadas de una gran muestra de estrellas gigantes de campo y de cúmulos globulares (16). Esta ecuación tiene la forma siguiente:

$$\theta_{\text{eff}} = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 - a_3 X [\text{Fe}/\text{H}] + a_4 [\text{Fe}/\text{H}] + a_5 [\text{Fe}/\text{H}]^2,$$

donde $X = (B - V)_0$ es el color intrínseco, a_0, \dots, a_5 son constante conocidas y $[\text{Fe}/\text{H}]$ es la metalicidad de la estrella obtenida a partir del equilibrio de ionización. El color intrínseco corregido por la extinción interestelar posee un valor de $(B - V)_0 = 0.685$. El enrojecimiento usado para la corrección del color es $E(B - V) = 0.142$ y su cálculo se explica con detalle en la sección determinación de la masa. El valor estimado a partir de dicha expresión es de 5155 ± 96 K.

Método espectroscópico

Una aproximación alterna no sólo a la temperatura efectiva sino también a la gravedad superficial y la metalicidad de HD 214714 puede ser hecha a partir de las calibraciones empíricas de (17). Estas calibraciones fueron calculadas de un conjunto de 220 estrellas gigantes de campo con tipos espectrales K y M. Cada parámetro atmosférico puede ser calculado a partir de medidas de los *EW* de líneas de absorción específicas; por ejemplo, $H\alpha$ ($\lambda 6562$ Å), Na ID ($\lambda 5889-95$ Å), Ca II ($\lambda 8498-8542-8662$ Å). Las calibraciones de (17) están basadas en el método desarrollado por (18). Los valores derivados para T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ son 5208 ± 191 K, 2.21 ± 0.39 y -0.43 ± 0.09 , respectivamente usando los *EW* de las líneas de Na ID y $H\alpha$. El método espectroscópico estándar en la determinación de los parámetros atmosféricos proviene de la selección de las líneas neutras e ionizadas del Fe, puesto que este elemento es el mejor representado en la región óptica del espectro estelar. En la esti-

mación de la temperatura efectiva se elimina la dependencia de las abundancias determinadas de Fe I o Fe II con respecto al potencial bajo de excitación, claramente se debe ir cambiando la gravedad superficial. Por otra parte, la estimación de la gravedad superficial se realiza consiguiendo que las abundancias determinadas de Fe I o Fe II conduzcan a valores similares para un valor dado de T_{eff} . Finalmente, la velocidad de microturbulencia se determina haciendo que los valores de las abundancias derivadas a partir del Fe II ($\log \epsilon$ (Fe II)) sean independientes de los *EW* reducidos ($\log \epsilon(\text{EW}/\lambda)$). Esto significa que la pendiente en un gráfico $\log \epsilon$ (Fe II) versus $\log \epsilon(\text{EW}/\lambda)$ tienda a cero.

La escogencia de un modelo atmosférico con los parámetros atmosféricos adecuados ha de conducir a una correcta determinación de las abundancias químicas. La tabla 2 muestra los parámetros atmosféricos obtenidos a partir de métodos fotométricos y espectroscópicos por distintos autores incluyendo el valor adoptado en este trabajo para HD 214714.

Estimación de las abundancias elementales

Análisis usando los anchos equivalentes

En el cálculo de las abundancias químicas fotosféricas se ha empleado los *EW* de un gran número de elementos identificados en la atmósfera de la estrella y la subrutina *ABFIND* de la versión actualizada del código de síntesis espectral MOOG (1) que opera bajo condición de equilibrio termodinámico local (ETL). Los modelos atmosféricos utilizados en la derivación de las abundancias corresponden a los construidos por (2) bajo la suposición de una atmósfera plana-paralela, equilibrio hidrostático y equilibrio termodinámico local. La intensidad del oscilador $\log gf$ o el valor gf es un parámetro clave para deducir con precisión las abundancias elementales. De hecho, los valores de gf son recopilados de diferentes fuentes y sus in-

Tabla 2
Parámetros atmosféricos fotométricos y espectroscópicos para HD 214714

Referencias	$T_{\text{eff.fot}}$ (K)	$T_{\text{eff.esp}}$ (K)	$\log g_{\text{esp}}$	V_{turb} (km s ⁻¹)	$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{esp}}$
Este trabajo		5500	2,5	2,0	-0,40
(16)	5155				
(17)		5208	2,21		-0,43
(9)		5400	2,9	2,0	-0,40
(7)		5400	2,38	1,9	-0,36
(50)		5360	2,64		-0,36
(51)		5400	2,38		-0,36
(31)		5500	2,5	1,9	-0,55
Promedio		5378	2,50	1,8	-0,41
Desviación estándar		±95	±0,24	±0,2	±0,07

Nota: El valor promedio en los parámetros atmosféricos no incluye los valores derivados en este trabajo.

certidumbres pueden variar de un elemento a otro. Así por ejemplo, las incertidumbres en los valores experimentales del Fe I y Fe II se encuentran entre un 5% a 10%, para otros elementos del pico de Fe los errores en los valores de gf pueden variar entre 10% a 25%, mientras que los elementos de captura de neutrones su precisión puede alcanzar un 10% (19, 20). La sensibilidad en el cálculo de las abundancias químicas con respecto a las incertidumbres en los parámetros atmosféricos T_{eff} , $\log g$ y $[\text{Fe}/\text{H}]$ varía desde 0.10 para el Silicio hasta 0.34 para el Cromo.

Análisis usando síntesis espectral

El uso de síntesis espectral en la determinación de las abundancias químicas se encuentra limitado a un conjunto de líneas de interés (por ejemplo, las líneas de los elementos ligeros C, N y O), las cuales se encuentran mezcladas o afectadas por la estructura hiperfina, y que contrariamente dichas líneas generan valores inconsistentes al emplear para su análisis los EW. En la determinación de las abundancias de C, N y O se hace necesario colocar todos los datos atómicos que modele sintéticamente una región del espectro observado, de manera que

adjunten en la misma región con el modelo de referencia del espectro solar. Los rangos de longitud de onda del espectro solar han sido tomados de (21). Las abundancias solares requeridas para este trabajo han sido tomadas de (32). La notación usada para el cálculo de las abundancias se describen como sigue: la abundancia relativa al hidrógeno $[\text{X}/\text{H}] = \log \epsilon(\text{X}/\text{H}) - \log \epsilon(\text{X}/\text{H})_{\odot}$ donde la abundancia del elemento X está normalizada con respecto al hidrógeno, $\log \epsilon(\text{H}) = 12$, mientras que la abundancia relativa la hierro $[\text{X}/\text{Fe}] = [\text{X}/\text{H}] - [\text{Fe}/\text{H}]$.

La tabla 3 muestra las abundancias de todos los elementos fotosféricos encontrados en la superficie de la estrella HD 214714 usando el modelo atmosférico adoptado. Esta tabla contiene el elemento identificado, la abundancia solar adoptada, la abundancia de cada elemento relativo al hidrógeno, la desviación estándar, el número de líneas usadas en la síntesis como en análisis con los EW y la abundancia de cada elemento relativo al hierro.

Síntesis del Carbono

Las abundancias de carbono fueron calculadas de las bandas de C₂ (1,0) y C₂ (0,1)

Tabla 3
Abundancias químicas fotosféricas para HD 214714

Especies	$\log \varepsilon_{\odot}$	[X/H]	d.s.	N	[X/Fe]
Li I	1,05	+1,60		Syn(1)	+2,00
C I	8,39	-0,08	$\pm 0,01$	2	+0,32
C (C ₂)	8,39	-0,04		Syn(2)	+0,36
N (CN)	7,78	+0,37		Syn(1)	+0,77
O I	8,66	+0,09		Syn(1)	+0,49
Na I	6,17	-0,17	$\pm 0,05$	2	+0,23
Mg I	7,53	-0,44	$\pm 0,03$	2	-0,04
Si I	7,51	-0,28	$\pm 0,08$	7	+0,12
Ca I	6,31	-0,45	$\pm 0,13$	7	-0,05
Sc II	3,05	-0,64		Syn(2)	-0,24
Ti I	4,90	-0,51	$\pm 0,17$	4	-0,11
Ti II	4,90	-0,44	$\pm 0,11$	6	-0,04
V I	4,00	-0,59	$\pm 0,05$	2	-0,19
Cr I	5,64	-0,49	$\pm 0,05$	6	-0,09
Cr II	5,64	-0,45	$\pm 0,07$	4	-0,05
Mn I	5,39	-0,46		Syn(2)	-0,06
Fe I	7,45	-0,41	$\pm 0,09$	71	
Fe II	7,45	-0,40	$\pm 0,12$	9	
Co I	4,92	-0,34	$\pm 0,16$	3	+0,10
Ni I	6,23	-0,58	$\pm 0,11$	13	-0,18
Cu I	4,21	-0,71		Syn(2)	-0,31
Zn I	4,60	-0,39	$\pm 0,09$	2	+0,01
Y II	2,21	-0,29	$\pm 0,11$	3	+0,11
Zr II	2,59	-0,68	$\pm 0,06$	2	-0,28
Ba II	2,17	-0,39		Syn(1)	+0,01
La II	1,13	-0,14	$\pm 0,10$	2	+0,26
Ce II	1,58	-0,44	$\pm 0,07$	3	-0,04
Nd II	1,45	-0,40	$\pm 0,18$	3	0,00
Sm II	1,01	-0,30	$\pm 0,03$	2	+0,10
Eu II	0,52	-0,64		Syn(1)	-0,24

Nota: En la columna 5 se representa el número N de líneas identificadas por cada elemento. Los elementos que contienen la nomenclatura Syn(N) corresponden a número de líneas sintetizadas.

del sistema Swan ubicadas entre los rangos de longitudes de onda $\lambda 4730-50 \text{ \AA}$ y $\lambda 5626-37 \text{ \AA}$. Estas bandas de C_2 han mostrado ser útiles como un indicador de la abundancia de carbono en estrellas RCB (*R Coronae Borealis*, en inglés) tal como lo señala (22). Para complementar el análisis se utilizaron dos líneas atómicas de C I no afectadas por las mezclas y que se encuentran localizadas en $\lambda 5052 \text{ \AA}$ y $\lambda 5380 \text{ \AA}$ respectivamente, y sus abundancias fueron obtenidas a partir de los EW. La figura 1 muestra el espectro observado y los espectros sintetizados de HD 214714 para las dos regiones alrededor de $\lambda 4735 \text{ \AA}$ y $\lambda 5635 \text{ \AA}$.

Síntesis del Nitrógeno

La abundancia de nitrógeno fue calculada de la banda molecular de CN (5,1) ubicada en $\lambda 6332 \text{ \AA}$ perteneciente al sistema de la región roja del espectro. Esta banda molecular se encuentra afectada por la mezcla de dos líneas en $\lambda 6331.9 \text{ \AA}$; una de ella pertenece a Si I y la otra pertenece a Fe II. La figura 2 muestra el espectro observado y los espectros sintetizados de HD 214714 para la región alrededor de $\lambda 6331-36 \text{ \AA}$. Se puede observar de la Figura 2 que el núcleo de esta línea se encuentra desplazado hacia la región azul del espectro. En este sentido, la abundancia de N determinada para HD 214714

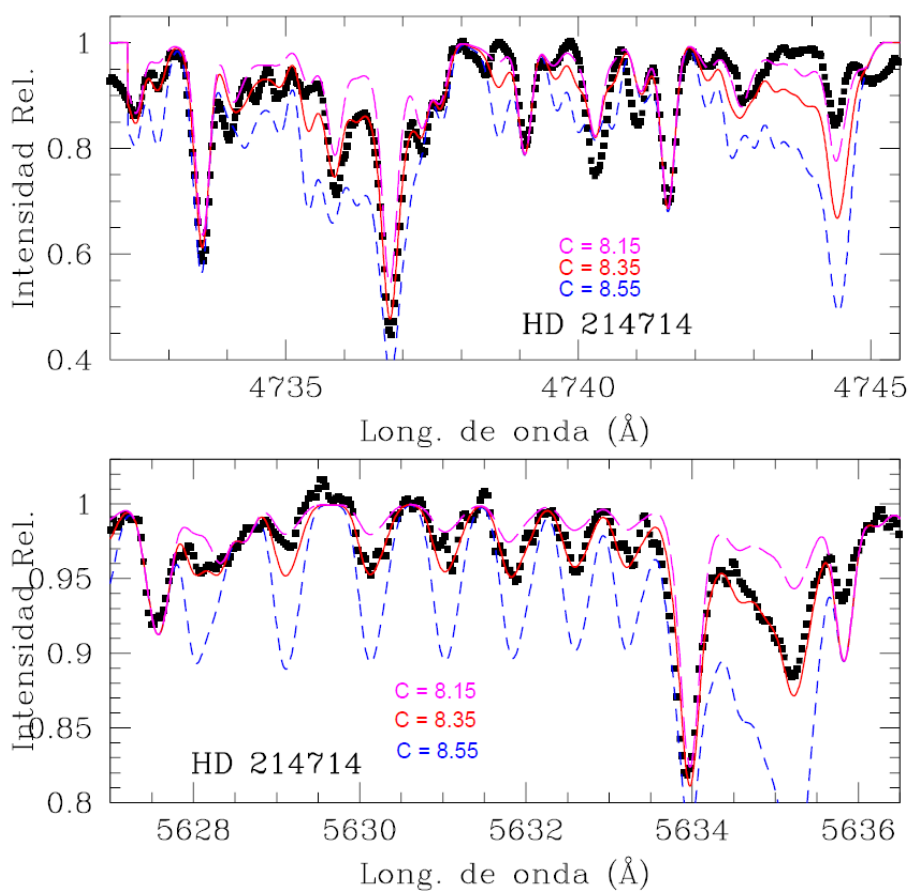


Figura 1. Representación del espectro observado (cuadrados rellenos) y los espectros sintetizados con diferentes valores de abundancias (líneas fucsia, rojo y azul) para dos regiones espectrales. El mejor valor en la abundancia de C corresponde a la síntesis de color rojo.

corresponde solamente a un límite superior debido a las razones antes expuestas. Otra de las bandas moleculares del sistema en el rojo, es CN (6,2) ubicada en $\lambda 6478 \text{ \AA}$. No obstante, la determinación del N no es posible realizarse debido a que la línea se encuentra en emisión.

Síntesis del Oxígeno

La abundancia del oxígeno fue calculada usando la línea prohibida [O I] ubicada en $\lambda 6300.304 \text{ \AA}$. La línea de oxígeno prohibida ubicada en 6300 \AA ha sido ampliamente usada en la determinación de las abundancias en estrellas gigantes frías con temperaturas menores a 5750 K (7, 31, 44). Las líneas del triplete de O I en 6165 \AA no están presentes a una temperatura de 5500 K . Igualmente, debido al corto rango espectral de nuestro espectro tampoco nos permite medir los EW del triplete de O I en 7774 \AA .

Para la síntesis del [O I] se adopta el valor de la intensidad del oscilador $\log g = -9.717$ obtenido del análisis de la abundancia solar del O llevada a cabo por (23). La línea prohibida se encuentra mezclada con una débil línea de Ni I en $\lambda 6300.339 \text{ \AA}$, la cual contribuye muy poco a la línea de oxígeno. (24) ha mostrado experimentalmente que la línea de Ni I está constituida por dos componentes isotópicas, ^{58}Ni y ^{60}Ni respectivamente. Se adoptan para la síntesis los valores de gf obtenidos por (25), esto es, $\log(^{58}\text{Ni}) = -2.275$ ($\lambda 6300.335 \text{ \AA}$) y $\log(^{60}\text{Ni}) = -2.695$ ($\lambda 6300.355 \text{ \AA}$) respectivamente. La figura 3 muestra la síntesis espectral de HD 214714 en la región de [O I].

Síntesis del cociente $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$

El cociente isotópico $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ para la estrella HD 214714 pudo ser estimado de la línea atómica ubicada en $\lambda 4744.39 \text{ \AA}$, el cual es coincidente con la débil banda que contiene $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ en la región espectral en $\lambda 4732-45 \text{ \AA}$ (22). Se obtiene la mejor estimación del cociente isotópico $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 13$, tomando la diferencia entre el espectro sintetizado y

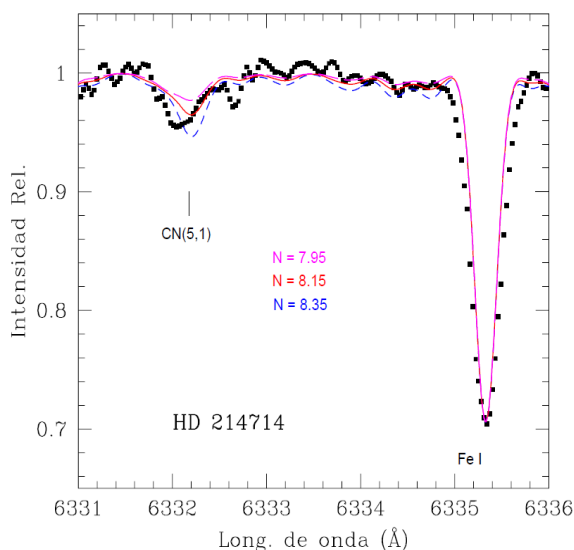


Figura 2. Representación del espectro observado (cuadrados rellenos) y los espectros sintetizados con diferentes valores de abundancias (líneas fucsia, rojo y azul) para la región espectral alrededor de $\lambda 6332 \text{ \AA}$. El mejor valor en la abundancia de N corresponde a la síntesis de color rojo.

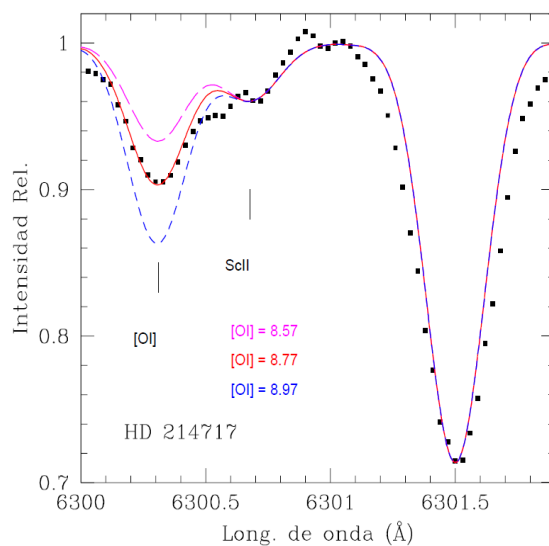


Figura 3. Representación del espectro observado (cuadrados rellenos) y los espectros sintetizados con diferentes valores de abundancias (líneas fucsia, rojo y azul) para la región espectral alrededor de $\lambda 6300 \text{ \AA}$. El mejor valor en la abundancia de O corresponde a la síntesis de color rojo.

el espectro observado. Este procedimiento fue realizado debido a que las bandas de ^{12}C y ^{13}C en la región son relativamente débiles para obtener una estimación precisa de dicho cociente.

Consideraciones de la estructura hiperfina

En el espectro estelar algunas de las líneas de absorción identificadas pueden verse afectadas por ensanchamiento debido a la presencia de la estructura hiperfina (hfs). En términos del estudio de las abundancias estelares, la hfs tiene el efecto de saturar las líneas más fuertes, en consecuencia, cuando se realiza un análisis de las abundancias en líneas fuertes es importante considerar dichas componentes. Para las líneas débiles, por el contrario, el tratamiento de hfs no es tan crítico debido a que estas no se encuentran saturadas. En el análisis llevado a cabo en el presente trabajo se han adoptado las hfs para las líneas de Sc II, Mn I, Ba II, Eu II y Li I cuyas referencias están descritas en (26).

Determinación de la masa

En la determinación de la luminosidad de HD 214714, se ha empleado las nuevas paralajes de Hipparcos derivadas por (27), la magnitud aparente tomada de la base de datos SIMBAD, la corrección bolométrica (BC) calculada de las calibraciones de (16) y el exceso de color $E(B-V)_{NED} = 0.166$ estimado a partir de la base de datos NED (Nasa Extragalactic Database). Este exceso de color ha sido corregido usando la expresión $E(B-V) = 0.10 + 0.65 [E(B-V)_{NED} - 0.1]$ de (28) y, en consecuencia, se alcanza un valor final de $E(B-V) = 0.142$. Por otra parte, la magnitud absoluta fue determinada de la expresión $M_V = V_0 - 5 \log(1/\pi) + 5$, donde $V_0 = V - 3.1 E(B-V)$. Se adopta una magnitud bolométrica solar $M_{bol\odot} = 4.73$ (29), el cual conduce a un valor final de la luminosidad de $\log(L_*/L_\odot) = 2.67 \pm 0.10$. La masa de HD 214714 fue estimada a partir de su representación en el DHR tomando en cuenta la temperatu-

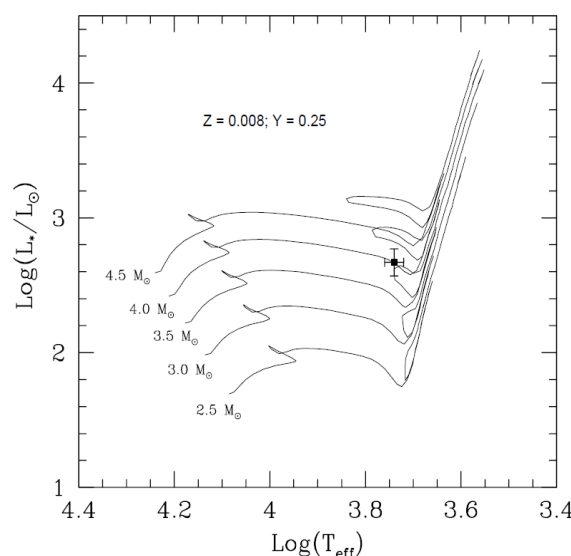


Figura 4. Representación de la estrella HD 214714 en el diagrama HR. Se muestran las distintas trayectorias evolutivas para masas entre $2.5 M_\odot$ y $4.5 M_\odot$.

ra efectiva, la luminosidad y las trayectorias evolutivas para distintas masas con una metalicidad $Z = 0.008$ construidas por (30). La figura 4 muestra el DHR para HD 214714. Dentro de la incertidumbre en la temperatura efectiva y la gravedad superficial la estrella tiene una masa de $4.0 \pm 0.2 M_\odot$. Su representación en el DHR muestra que la estrella HD 214714 se mueve, por primera vez, hacia el brazo rojo de las gigantes (RGB) dentro de la región llamada la brecha Hertzsprung.

Resultados y discusión

Los resultados de los parámetros atmosféricos adoptados en este trabajo son consistentes con los obtenidos por diferentes autores (tabla 2). Con respecto a las abundancias de CNO, el valor de 8.31 derivado de la abundancia de carbono a partir de las líneas atómicas $\lambda 5052 \text{ \AA}$ y $\lambda 5380 \text{ \AA}$, es coherente dentro de sus incertidumbres con el valor de 8.35 obtenido de las bandas $C_2(1,0)$ y $C_2(0,1)$ del sistema Swan. (31) analizaron la región de $C_2(0,1)$ en $\lambda 5626-37 \text{ \AA}$ y encontraron un valor para la abundancia de C de

Tabla 4
Abundancias de C, N y O para la estrella HD 214714

Referencias	[C/Fe]	[N/Fe]	[O/Fe]	[Fe/H]
(9)	+0,4	-0,4
(7)	+0,18	+0,28	+0,28	-0,38
(31)	+0,55	+0,6	+0,45	-0,55
Este trabajo	+0,34	+0,77	+0,49	-0,40

8.53. Claramente, ambos trabajos hacen uso de la misma región espectral, sin embargo, este último resultado es mayor que el nuestro por un factor de 0.2. La discrepancia existente entre ambos resultados en la abundancia de C, pudiera ser consecuencia de la lista de líneas adoptadas. En el cálculo de la abundancia de C se ha utilizado la lista de moléculas de C₂ empleada por (22).

Los resultados de las abundancias de CNO relativas al Fe calculadas en este trabajo, han sido contrastados con los resultados derivados por otros autores y cuyos valores se muestran en la tabla 4, donde se observa que el valor del cociente [C/Fe] derivado en este trabajo coincide con el obtenido por (9) y es casi el doble con respecto al valor derivado por (7). Igualmente, los cocientes [N/Fe] y [O/Fe] son consistentes con el trabajo de (31) pero mayores con respecto a los obtenidos por (7). (31) sugieren que las diferencias observadas en las abundancias de C, N y O con respecto a las abundancias derivadas por (7), son atribuidas a diferencias en metalicidad. Sin embargo, este argumento no parece ser consistente puesto que en este estudio el cociente de metalicidad es similar al de (7), pero nuestras abundancias muestran un enriquecimiento relativo al Fe similar al observado por (31), salvo el carbono por las razones antes expuestas.

Para verificar si HD 214714 pudo haber experimentado el evento del primer dragado, se necesita encontrar el cociente [N/C]. La predicción teórica posterior al primer dragado desarrollada a partir del modelo evolutivo estándar para estrellas con masas entre 2 M_⊙

y 15 M_⊙ (36), muestra que este cociente debe alcanzar un valor de [N/C] = +0.60.

(7) obtiene para la muestra de estrellas gigantes con bandas débiles de cianógeno un valor que varía entre +0.4 y +0.5. El valor estimado para HD 214714 por (31) es de +0.05 (este valor sugiere que la estrella no ha sufrido eventos de mezclas en su etapa evolutiva). El cociente [N/C] estimado a partir de este trabajo alcanza un valor de +0.42. Este valor se encuentra dentro del rango obtenido por (7), en consecuencia, se puede argüir que la estrella HD 214714 ha sufrido de eventos ligeros de mezclas sin haber alcanzado el primer dragado.

Otro indicador de la existencia de posibles mezclas en las estrellas es el cociente isotópico ¹²C/¹³C, el cual es dependiente de la metalicidad y la masa inicial de la estrella. En estrellas con masas menores que 2.3 M_⊙, la teoría estándar del primer dragado predice que la mezcla de los elementos procesados por la combustión nuclear del hidrógeno conlleva a remover el ¹²C de la superficie, aumentando el ¹³C. Esto conduce a una disminución el cociente ¹²C/¹³C ≈ 20 – 30 desde su valor solar inicial (~90), y a su vez, incrementa los valores de ¹⁴N en la superficie. Se ha observado que las estrellas con muy bajo cociente isotópico de carbono (¹²C/¹³C ≤ 10) pueden sufrir de un mayor proceso de extra mezclado, mientras que las estrellas con 10 < ¹²C/¹³C ≤ 20 sufren de un menor proceso de mezcla (35).

En estrellas con masas iniciales mayores que 2.3 M_⊙, no se espera encontrar un cociente isotópico de carbono bajo en la su-

perficie (o estrellas con procesos de extra-mezclados). (9) encuentra un valor de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} > 10$, mientras tanto (7) deriva un valor de 25 para dicho cociente. En este trabajo, se estima un valor de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 13$, lo cual sugiere un ligero evento de mezcla en la superficie de HD 214714.

Finalmente, es interesante notar que el valor de la abundancia $(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.98$ derivada para HD 214714, es muy similar a la abundancia $(\text{C} + \text{N} + \text{O})_{\odot} = 8.88$ obtenida para el Sol. Esto nos señala que a pesar de que la estrella es medianamente pobre en metal, las abundancias de CNO se mantienen prácticamente inalteradas con respecto al valor solar.

Abundancia de Li

El Li es un elemento frágil, el cual puede ser fácilmente destruido en el interior estelar a temperaturas más altas que $\sim 2.5 \times 10^6$ K. Cuando la estrella evoluciona a la fase de la gigante roja, la envolvente convectiva penetra y libera a la superficie estelar material que ha sido expuesto a altas temperaturas en el interior estelar, causando una dilución general del Li en la atmósfera. Por lo tanto, las estrellas en la rama de las gigantes rojas son esperadas a presentar una baja cantidad de Li. La abundancia de Li encontrada en meteoritos es de $\log \varepsilon(\text{Li}) = 3.3$ (37), mientras que el modelo estándar predice la dilución de Li en la fase RGB para el primer dragado hasta un nivel de $\log \varepsilon(\text{Li}) = 1.5$, dependiendo de la masa y de la metalicidad (38, 39).

Todos los trabajos previos concuerdan que el Li en HD 214714 es sobreabundante, sin embargo, no todas las estrellas clasificadas con bandas débiles de CN muestran este tipo de características, esto puede ser visto por ejemplo, en la estrella HD 7606 donde el Li es prácticamente removido de la superficie. En consecuencia, el Li al igual que los cocientes $[\text{N}/\text{C}]$ y $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, es uno de los pocos indicadores de los procesos de mezclas convectiva que puede afectar la composición superficial de las estrellas.

Nuestra abundancia de Li ($\lambda 6707 \text{ \AA}$) relativa al Fe es consistente con los valores obtenidos por (9), (7) y (31). El valor de la abundancia para HD 214714 es obtenido a partir de síntesis espectral empleando el doblete de Li ubicado en $\lambda 6707 \text{ \AA}$.

Nuestro valor de la abundancia obtenido a partir de síntesis alcanza un valor $\log \varepsilon(\text{Li}) = 2.65$, este resultado indica que el Li es ligeramente más bajo que el valor originario obtenido a partir del análisis de abundancias en meteorito, además, se encuentra dentro de la incertidumbre deducida a través de la nucleosíntesis del Big Bang (2.72 ± 0.06) (40), y es más alto de lo predicho para el primer dragado en la fase RGB. De acuerdo con (9), la alta abundancia de Li observada en HD 214714, podría ser explicado ya sea como parte el litio original con que la estrella nació o como un resultado del proceso Cameron y Fowler (41) durante la evolución estelar con un rápido mezclados.

En resumen teniendo en cuenta que nuestra estrella no ha alcanzado aún la fase del brazo de las gigantes rojas y de acuerdo con los resultados de los cocientes $[\text{N}/\text{C}]$ y $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, se puede deducir que probablemente la estrella HD 214714 ha sufrido un evento previo de mezcla.

Abundancia de los elementos-alfa

Por otra parte, los elementos-alfa son producidos en la nucleosíntesis de supernovas (SNe II) (42) y muestran enriquecimiento en estrellas pobres en metales. Contrariamente, los elementos del proceso-alfa como el Mg, Ca y Ti no se encuentran enriquecidos con respecto al Fe, tal como se esperaría para estrellas medianamente pobres en metal. Dentro de este grupo de elementos-alfa, el Si es el único que presenta una abundancia con un ligero fortalecimiento respecto al Fe, estando por encima del valor solar. Este comportamiento de las abundancias casi planas de estos elementos puede observarse en la muestra de estrellas gigantes G y K en (43) y estrellas gigantes del disco delgado en (44).

De acuerdo a la expresión derivada por Alves-Brito *et al.*, el cociente $[\alpha/\text{Fe}]$ en el disco grueso galáctico (donde $\alpha \equiv [(\text{Mg} + \text{Ca} + \text{Ti})/\text{Fe}]$) puede ser encontrado con un valor a la metalicidad $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.40$ de $[\alpha/\text{Fe}] = +0.26 \pm 0.06$. Sin embargo, el valor obtenido a partir de nuestros valores observados para HD 214714 conduce a un valor similar a esperado a metalicidad tipo solar, es decir, $[\alpha/\text{Fe}] \sim 0$. El comportamiento del cociente $[\alpha/\text{Fe}] \sim 0$ a mediana metalicidad ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.40$), también puede ser visto en estrellas enanas y gigantes pertenecientes al disco delgado de la Galaxia (33, 34, 44).

Abundancia de los elementos del tipo Ni

Un subconjunto de elementos similares al Ni vienen a ser Na, Mn, Cr, Ni y Cu. (45) fueron los primeros que mostraron que las abundancias de estos elementos (relativos al Fe) tienen comportamientos similares en estrellas del disco delgado y el disco grueso de la Galaxia. Las abundancias calculadas para los elementos Mn, Cr y Ni muestran una tendencia similar a las observadas en estrellas gigantes de campo G y K del disco interno y en estrellas gigantes del bulbo galáctico medianamente pobres en metales (44, 46-48). Por el contrario, la abundancia de sodio $[\text{Na}/\text{Fe}] = +0.23$ muestra un moderado enriquecimiento probablemente debido a la captura de protones por el ^{22}Ne durante la combustión de hidrógeno, mientras que la abundancia de cobre $[\text{Cu}/\text{Fe}] = -0.31$ parece ser más deficiente que el esperado a mediana metalicidad.

Abundancia de los elementos del tipo Mg

Un subconjunto de los elementos tipo Mg son los llamados elementos-alfa, estos son: C, O, Mg, Si, Ca, y Ti. Adicionalmente, otros elementos tipo Mg son Al, Sc, V, Co y posiblemente el Zn. En esta sección se discutirán los resultados de algunos de estos elementos identificados en este estudio.

- *Magnesio*. La abundancia $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ derivada en este trabajo tiene una tendencia

plana a la metalicidad encontrada para la estrella HD 214714. Este comportamiento de las abundancias ha sido observado en estrellas enanas del disco delgado de la Galaxia a la metalicidad $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.4$ (33, 34), y en estrellas gigantes hasta una metalicidad $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.2$ (42, 47).

- *Escandio*. Se ha observado en estudios previos que el cociente $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$ muestra valores similares para las estrellas del disco delgado y disco grueso con tendencia a decrecer a metalicidad $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.3$. En la muestra estudiada por (33), (34) se observa que a medida que la metalicidad disminuye, también disminuye el cociente $[\text{Sc}/\text{Fe}]$ en las estrellas del disco delgado hasta $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$. Nuestro valor de $[\text{Sc}/\text{Fe}] = -0.24$ es consistente con lo observado por (33, 34) para estrellas enanas del disco delgado. En la muestra de estrellas gigantes observadas por (43) y (47) la tendencia de las abundancias es a mantenerse plana a medida que decrece la metalicidad.
- *Vanadio*. El resultado del cociente $[\text{V}/\text{Fe}]$ como función de la metalicidad obtenido de este estudio, es consistente a los derivados para las estrellas enanas del disco delgado por (33, 34), y para las estrellas gigantes en (43).
- *Cobalto*. Nuestro resultado del cobalto relativo al Fe muestra una abundancia ligeramente enriquecida con respecto al valor solar. Este valor sigue una tendencia plana tal como lo sugiere (33, 34) para estrellas enanas del disco grueso galáctico y en concordancia con lo obtenido por (45). Para las estrellas enanas del disco delgado (33, 34) señala que el comportamiento del cobalto es a decrecer a medida que decrece la metalicidad ($-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.0$). Para las estrellas gigantes, la relación $[\text{Co}/\text{Fe}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$ tiende a ser plana hasta una metalicidad de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$, más allá el

cociente $[\text{Co}/\text{Fe}]$ tiende a incrementar ligeramente sus abundancias (47).

- **Zinc.** El valor solar del cociente $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ obtenido en este trabajo es consistente con las muestras de estrellas enanas, gigantes y del halo de la Galaxia estudiadas previamente por (33, 34) y (49).

Abundancia de los elementos del proceso de captura de neutrones

La síntesis de los elementos más allá del grupo de hierro ocurren por dos procesos de captura de neutrones: el *proceso lento* que ocurre a partir de la nucleosíntesis en la fase asintótica de las gigantes (AGB) y el *proceso rápido* que ocurren probablemente después de la explosión del núcleo de SNe II. Las abundancias de los elementos como Y, Zr, Ba, Ce y Nd con respecto al hierro derivados para la estrella HD 214714, son consistentes con los resultados obtenidos por (33, 34) para estrellas enanas del disco delgado y disco grueso de la Galaxia. La relación $[\text{X}/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$ para las estrellas gigantes tardías con tipo G muestra un comportamiento similar al obtenido para los elementos como Y, Ce y Nd (47). Esto mismo se observa para los elementos Ba y Nd de la muestra de estrellas K gigantes de (48). Por otra parte, el cociente $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$ muestra un comportamiento similar dentro de su incertidumbre a los derivados para las estrellas gigantes y enanas.

Conclusiones

Se han analizados las abundancias químicas fotosféricas de 26 elementos identificados en la estrella HD 214714, también se han derivados sus parámetros atmosféricos (T_{eff} , $\log g$, V_{turb} y $[\text{Fe}/\text{H}]$) a partir de los anchos equivalentes de las líneas de Fe I y Fe II y, fue estimada la masa a través de la posición de la estrella en el DHR con la ayuda de trayectorias evolutivas estelares. Del estudio hecho de la estrella HD 214714 se puede concluir lo siguiente:

1. La velocidad radial heliocéntrica de la estrella permanece prácticamente cons-

tante para diferentes épocas de observación.

2. Los parámetros atmosféricos son consistente con aquellos derivados por otros autores.
3. Nuestras abundancias de C, N y O relativas al Fe son consistente con las obtenidas por (31) calculadas con una metalicidad ligeramente mayor, y son relativamente más alta que las abundancias derivadas por (7) a la misma metalicidad. De acuerdo a sus valores relativos al Fe, la estrella no parece haber alcanzado aún el primer dragado, aunque los cocientes $[\text{N}/\text{C}]$ y $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ sugieren probablemente que pudo haber existido algún evento de mezcla previo en la secuencia principal.
4. La abundancia de Li es sobreabundante con respecto al Fe, este resultado es consistente con los valores derivados por distintos autores.
5. El moderado enriquecimiento del Na parece indicar que ciclo Ne-Na se encuentra operando en el cascarón donde se genera la combustión del H.
6. La tendencia del cociente $[\alpha/\text{Fe}] \sim 0$, indica que la estrella pudiera pertenecer a la población del disco delgado de la Galaxia. Algunos otros elementos tipo Mg confirman este hecho, principalmente debido a que no se observa un enriquecimiento de los mismos.
7. Los resultados del cociente $[\text{X}/\text{Fe}]$ versus $[\text{Fe}/\text{H}]$ de los elementos-alfa, los elementos del pico de Fe y los elementos de captura de neutrones fueron encontrados a ser similares a los derivados en estrellas enanas con tipos F-G-K y en estrellas gigantes G-K.
8. El estado evolutivo de la estrella inferido de las abundancias fotosféricas y de su ubicación en el diagrama HR, parece indicar que la estrella se mueve por primera vez desde la secuencia principal hacia la rama de las gigantes rojas.

Referencias bibliográficas

1. SNEDEN C. An LTE Stellar Line Analysis Program. 2009.
2. CASTELLI F., KURUCZ R.L. **New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres**, IAU Symposium 210, Modelling of Stellar Atmosphere, Uppsala, Sweden, eds. N.E. Piskunov, W.W. Weiss and D. F. Gray, ASP-S210. 2003.
3. MORGAN W.W., KEENAN P.C., KELLMAN E. **An atlas of stellar spectra, with an outline of spectral classification**. Chicago, Ill. The University of Chicago press. 1943.
4. KEENAN P.C., YORKS, B. **Bull Inf Centre Donnees Stellaires** 29: 25. 1985.
5. GREENSTEIN Y KEENAN P.C. 1958.
6. SMITH G.H. **Publ Astron Soc Pac** 114: 1215-1221. 2002.
7. LUCK R.E. **Astrophys J Suppl Ser** 75: 579. 1991.
8. KEENAN P.C., MCNEIL R.C. **Astrophys J Suppl Ser** 71: 245-266. 1989.
9. BAIRD S.R., ROBERTS W.J., SNOW T.P., WALLERSTEIN G. **Publ Astron Soc Pac** 87: 385. 1975.
10. BARANNE A., QUELOZ D., MAYOR M., et al. **Astron Astrophys Suppl** 119: 373-390. 1996.
11. YOUNG R.K. **The radial velocities of 681 stars**, Publ. David Dunlap Obs., 1, 311-340. 1945.
12. WILSON R.E., JOY A. **Astrophys J** 111: 221. 1950.
13. WILSON R.E. **General catalogue of stellar radial velocities**. Washington, Carnegie Institution of Washington. 1953.
14. DUFLOT M., FIGON P., MEYSSONNIER N. **Astron Astrophys Suppl Ser** 114: 269. 1995.
15. GONTCHAROV G.A. **Astron Lett** 32(11), 759-771. 2006.
16. ALONSO A., ARRIBAS S., MARTÍNEZ-ROGER, C. **Astron Astrophys Suppl** 140: 261-277. 1999.
17. MOLINA R., STOCK J. **Rev Mex Astron Astrophys** 40: 181-191. 2004.
18. STOCK J., STOCK J.M. **Rev Mex Astron Astrophys** 35: 143. 1999.
19. GIRIDHAR S., MOLINA R., ARELLANO FERRO A., SELVAKUMAR G. **Mon Not R Astron Soc** 406: 290-306. 2010.
20. REDDY A.B.S., GIRIDHAR S., LAMBERT D.L. **Mon Not R Astron Soc** 419(2): 1350-1361. 2012.
21. HINKLE K., WALLACE L., VALENTI J., HARMER D. **Visible and Near Infrared Atlas of the Arcturus Spectrum** 3727-9300 Å, ed. Kenneth Hinkle, Lloyd Wallace, Jeff Valenti, and Dianne Harmer, (San Francisco: ASP) ISBN: 1-58381-037-4. 2000.
22. HEMA B.P., PANDEY G., LAMBERT D.L. **Astrophys J** 747: 102. 2012.
23. ALLENDE PRIETO C., LAMBERT D.L., ASPLUND M. **Astrophys J** 556: 63-66. 2001.
24. JOHANSSON S., LITZEN U., LUNDBERG H., ZHANG Z. **Astrophys J** 584(2): L107-L111. 2003.
25. BENSBY T., FELTZING S., LUNDSTROM I. **Astron Astrophys** 415: 155-170. 2004.
26. MOLINA R. E., ARELLANO FERRO A. **Rev Mex Astron Astrophys**. En arbitraje. 2012.
27. VAN LEEUWEN F. **Astron Astrophys** 474(2): 653-664. 2007.
28. BONIFACIO P., MONAI S., BEERS T.C. **Astron J** 120: 2065-2081. 2000.
29. GRAY D.F. **The Observations and Analysis of Stellar Photosphere**, (Cambridge: CUP), p. 506. 2005.
30. GIRARDI L., BRESSAN A., BERTELLI G., CHIOSI C. **Astron Astrophys Suppl** 141: 371-383. 2000.
31. VANTURE A.D., WALLERSTEIN G. **Publ Astron Soc Pac** 111: 84-93. 1999.
32. ASPLUND M., GREVESSE N., SAUVAL A.J. **The Solar Chemical Composition, Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis**, in honor of David L. Lambert, ASP Conference Series, Vol. 336, p.25. 2005.
33. REDDY B.E., TOMKIN J., LAMBERT D.L., ALLENDE PRIETO C. **Mon Not R Astron Soc** 340(1): 304-340. 2003.

34. REDDY B.E., LAMBERT D.L., ALLENDE PRIETO C. *Mon Not R Astron Soc* 367(4): 1329-1366. 2006.
35. AFSAR M., SNEDEN C., FOR B. Q. *Astron J* 144(1): 20. 2012.
36. SCHALLER G., SCHAERER D., MEYNET G., MAEDER A. *Astron Astrophys Suppl* 96(2): 269-331. 1992.
37. GREVESSE N., SAUVAL A.J. *Space Science Reviews* 85: 161-174. 1998.
38. IBEN I. Jr. *Astrophys J* 147: 624. 1967a.
39. IBEN I. Jr. *Astrophys J* 147: 650. 1967b.
40. CYBURT R.H., FIELDS B.D., OLIVE K.A. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 11: 12. 2008.
41. CAMERON, A.G.W., FOWLER, W.A. *Astrophys J* 164: 111. 1971.
42. WOOSLEY S.E., WEAVER T.A. *Astrophys J, Suppl* 110: 181. 1995.
43. WANG L., LIU Y., ZHAO G., SATO B. *Publ Astron Soc of Japan* 63: 1035. 2011.
44. ALVES-BRITO A., MELÉNDEZ J., ASPLUND M., RAMIREZ I., YONG D. *Astron Astrophys* 513: 35. 2010.
45. PROCHASKA J.X., NAUMOV S.O., CARNEY B.W., MCWILLIAM A, WOLFE A.M. *Astron J* 120(5): 2513-2549. 2000.
46. CHEN Y.Q., NISSEN P.E., ZHAO G., ZHANG H.W., BENONI T. *Astron Astrophys Suppl* 141: 491. 2000.
47. TAKEDA Y., SATO B., MURATA D. *Publ Astron Soc of Japan* 60(4): 781-802. 2008.
48. LIU F., CHEN Y.Q., ZHAO G., HAN I., LEE B.C., KIM K.M., ZHAO Z.S. *Mon Not R Astron. Soc* 422: 2969. 2012.
49. SNEDEN C., GRATTON R.G., CROCKER D.A. *Astron Astrophys* 246(2): 354-367. 1991.
50. CENARRO A.J., PELETIER R.F., et al. *Mon Not R Astron Soc* 374: 664-690. 2007.
51. SOUBIRAN C., Le CHAMPION J.F., CAYREL de STROBEL G., CAILLO A. *Astron Astrophys* 515: 111. 2010.