

# Caracterización de las curvas de luz en estrellas B evolucionadas

M. Ruiz Díaz<sup>1</sup>, A. Alberici Adam<sup>1</sup>, A. Christen<sup>3</sup>, Y. Aidelman<sup>1,2</sup> & L. Cidale<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

<sup>2</sup> Departamento de Espectroscopía, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Física y Astronomía, Facultad de Ciencias, Universidad de Valparaíso, Chile

Contacto / matiruizdiaz@fcaglp.unlp.edu.ar

**Resumen** / En base a resultados astrosismológicos de curvas de luz, el diagrama H-R se ha ido poblando con diversas regiones de inestabilidad que indican que casi todas las estrellas pulsan en modos específicos. Recientemente, se ha demostrado también que las pulsaciones excitadas por modos extraños podrían inducir fenómenos de pérdida de masa variable en las estrellas supergigantes. A fin de comprender mejor estos fenómenos, hemos analizado las curvas de luz obtenidas por TESS de un grupo de estrellas B evolucionadas del hemisferio sur. Asimismo, se buscaron vínculos entre los patrones de frecuencias y los parámetros estelares, tales como posición en el diagrama H-R y abundancia superficial de elementos químicos. Estos indicadores permitirán discutir posibles estados evolutivos de las estrellas estudiadas.

**Abstract** / Based on asteroseismological results of light curves, the H-R diagram is being populated with various regions of instability that indicate that almost all stars pulsate in specific modes. Recently, it has also been shown that pulsations excited by strange modes could induce variable mass-loss phenomena in supergiant stars. In order to better understand these phenomena, we have analyzed the TESS light curves of a group of evolved B-type stars in the southern hemisphere. In addition, links between frequency patterns and stellar parameters, such as: star positions in the H-R diagram and surface overabundance of chemical elements were sought to discuss possible evolutionary states of the studied stars.

**Keywords** / supergiants — stars: abundances — stars: oscillations (including pulsations)

## 1. Introducción

Las estrellas supergigantes OBA evolucionan a partir de estrellas enanas de tipos espectrales O y B tempranos. Se espera que estas estrellas masivas entren en la fase de supergigante azul (BSG) inmediatamente después de abandonar la secuencia principal, o bien después de una fase de supergigante roja (RSG). Esto se debe a que el camino evolutivo de una estrella masiva presenta un bucle azul (*blue loop*) si es que la estrella tiene una masa inicial suficientemente grande. La masa límite para que una estrella masiva realice un bucle azul en su camino evolutivo depende de los fenómenos de mezclado rotacional, pérdida de masa, semiconvección y *overshooting* en el núcleo convectivo. Como estos procesos aún no tienen un tratamiento teórico preciso existen grandes incertezas sobre si las BSG se encuentran en una fase previa o posterior a la de RSG. Saio et al. (2013) introducen un método que permite diferenciar entre estas dos posibilidades, analizando las propiedades pulsacionales de las estrellas.

Aerts et al. (2009) y Simón-Díaz et al. (2010) han propuesto que las estrellas supergigantes O y B también podrían presentar pulsaciones. Los modos de oscilación típicos de estas pulsaciones serían de tipo *p* (con períodos de horas hasta casi un día) y tipo *g* (con períodos de 2 a 10 días) excitados por el mecanismo  $\kappa$ . Se espera además observar modos excitados generados

por el mecanismo  $\varepsilon$  (Unno et al., 1989), modos extraños de excitación (períodos entre 10 y 100 días, Saio et al., 1998; Glatzel, 2009; Kraus et al., 2015) y excitaciones estocásticas generadas por diferentes mecanismos (Mathis et al., 2014; Aerts & Rogers, 2015). El estudio de las pulsaciones en estrellas masivas evolucionadas se puede llevar a cabo a partir del análisis de los datos espectroscópicos y fotométricos (Saio et al., 2006; Kraus et al., 2012). Estas pulsaciones se manifiestan tanto en el espectro estelar, generando un efecto variable en el ensanchamiento de los perfiles de las líneas\* como en la fotometría produciendo variaciones detectables en las curvas de luz mediante métodos astrosismológicos.

Para el análisis presentado en la siguiente sección, utilizamos los datos de la misión espacial TESS (Ricker et al., 2014), ya que permite estudiar la variabilidad fotométrica con mucha precisión. Esto se debe a que el satélite monitorea un mismo campo a lo largo de 27 días y noches. Luego, procesa las imágenes para obtener curvas de luz con una cadencia de 2 ó 30 minutos. De este modo, es posible detectar oscilaciones de una  $\mu\text{mag}$ , lo que permite la construcción de curvas de luz de alta calidad (como se muestra en la Fig. 1, panel superior). Las curvas de luz están presentadas en dos formatos: Foto-

\*Este fenómeno, por ejemplo, se observa en las estrellas enanas y gigantes de tipo espectral B ubicadas en las regiones de inestabilidad de las  $\beta$ -Cep y las SPB (*Slowly Pulsating B stars*)

metría de apertura simple (SAP por sus siglas en inglés) y preprocesada (PDCSAP). Hemos optado por usar el primer formato, debido a que el segundo es específico para búsqueda de tránsitos de exoplanetas con períodos de unos pocos días.

## 2. Metodología

En este trabajo hemos estudiado curvas de luz adquiridas por TESS correspondientes a 14 estrellas clasificadas como supergigantes B y una como gigante B por Haucke et al. (2018). La mayoría de estas estrellas tienen más de una curva de luz, tomadas en distintas épocas.

Para analizar las curvas de luz utilizamos el paquete WAVELETCOMP (Roesch & Schmidbauer, 2018), libre y escrito en lenguaje R. Este paquete es especialmente útil para detectar señales no periódicas y no estacionarias\*\* ya que se basa en el análisis continuo de ondículas (*wavelets*) de series temporales univariadas y bivariadas (Bravo et al., 2014).

La transformada *wavelet* da información acerca de la potencia de las frecuencias que actúan en la señal y de su variabilidad en el tiempo.

Utilizando el paquete WAVELETCOMP es posible obtener un escalograma, es decir un diagrama que muestra el espectro de potencias de la transformación *wavelets*, en el cual se pueden observar los períodos más probables para las variaciones encontradas.

En la Fig. 1 se muestran, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos del análisis de la curva de luz correspondiente a la estrella HD 64760. En el panel superior, se muestra la reconstrucción de dicha curva a partir de la transformada *wavelet* como prueba de la bondad del ajuste. Cada curva ha sido analizada en partes debido a que presentan brechas temporales de unos 4 días y el programa no lo interpreta correctamente.

## 3. Resultados

Las estrellas analizadas en este trabajo fueron previamente agrupadas según su composición química (Haucke, 2018): normales (de metalicidad solar), ricas en carbono (BRC), ricas en nitrógeno (BRN) y las que presentan abundancia de ambos elementos (MP, por materia moderadamente procesada). En la tabla 1 se presentan los valores medios de los períodos con comportamiento variable ( $v$ ) hallados mediante el ajuste de *wavelets* para la muestra analizada, junto a la clasificación descrita al inicio de esta sección. Aquí se reportan períodos por primera vez para algunas de estas estrellas. Otros períodos (variables) encontrados son próximos a los previamente reportados.

Se observa que solo las primeras 5 estrellas de la tabla, clasificadas como normales, presentan períodos menores a 2 días, mientras que el resto de las supergigantes muestran períodos más largos.

La Fig. 2 muestra, en el diagrama HR, la ubicación de las regiones de inestabilidad dadas por Saio (2011). Las líneas grises, a trazos y guiones, y puntos, son para

\*\*Por señal no estacionaria se entiende una señal variable cuyos períodos no son constantes.

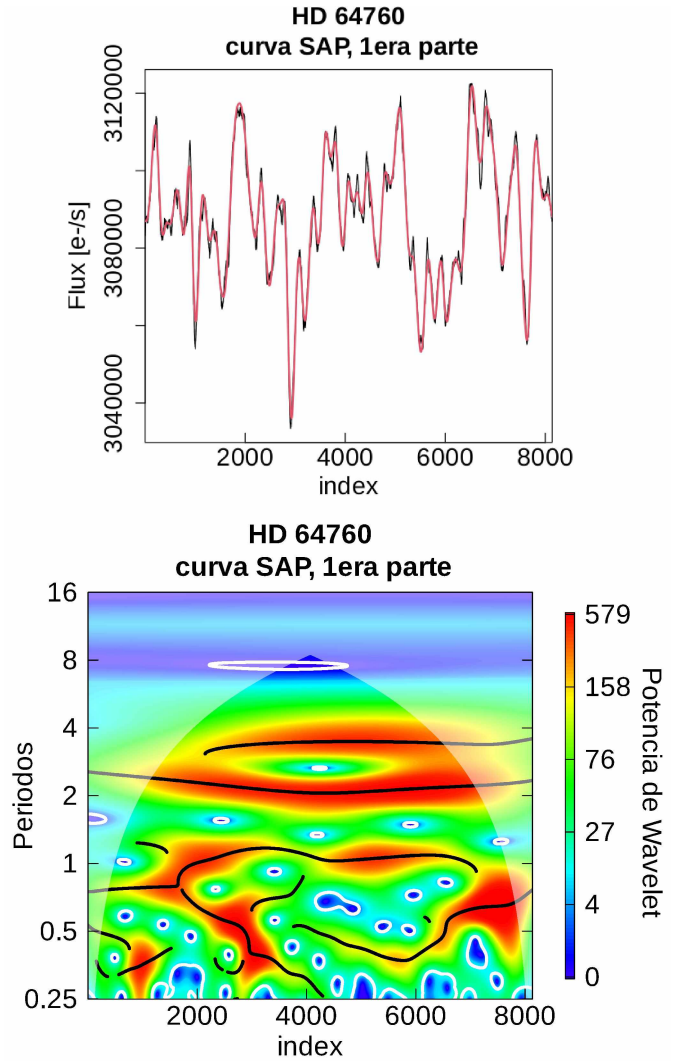


Figura 1: *Panel superior:* En rojo se muestra la reconstrucción de la curva de luz de la estrella HD 64760 (electrones por segundos en función de un índice que representa la cantidad de datos) a partir de la transformada *wavelet*.

*Panel inferior:* Escalograma de la transformada *wavelet*. Los colores representan la intensidad de los coeficientes de la transformada. Las líneas negras representan los valores de los períodos más probables para las variaciones encontradas con un nivel de significancia inferior a 0.05.

oscilaciones por modos  $p$  de alto y bajo orden (radial y no radial), respectivamente. La línea negra punteada es el límite por encima del cual se presentan los modos monótonamente inestables; las líneas continuas rojas y azules son para modos  $g$  no radiales con  $\ell = 1$  y  $\ell = 2$ , respectivamente; las líneas de puntos y guiones son para los modos de convección oscilatoria (línea roja para  $\ell = 1$ , línea azul para  $\ell = 2$ ) que indican los límites de la región donde la relación entre la amplitud fotosférica y la amplitud máxima en el interior es mayor que 0.2. Observando en el diagrama HR la posición de las 5 estrellas mencionadas anteriormente se ve que las mismas se ubican marcadamente cerca de la secuencia principal.

Tabla 1: Períodos de estrellas B supergigantes hallados en este trabajo.

HD	V	T.E. <sup>1</sup>	Comp. química <sup>1</sup>	Períodos <sup>1</sup> [días]	Períodos [días] (este trabajo)
38771	2.06	B0.5 Ia	Normal	1.047, 1.9, 4.76, 6.5, 9.5	0.48v, 1.11v, 2.95v, 3.92v, 5.09v
52089	1.50	B1.5 II	Normal		0.75v, 1.04v, 1.27v, 1.99v, 4.80v, 5.65v
52382	6.57	B1 Ia	Normal		1.25v, 2.77v, 5.79v
64760	4.24	B0.5 Ib	Normal	1.2, 1.8, 2.4, 2.8, 6.8	0.47v, 0.72v, 1.15v, 2.22v
115842	6.09	B0.5 Ia/ab	Normal	10.309, 13.38	1.43v, 2.09v, 3.65v, 7.56v
148688	5.39	B1 Iaeqp	Normal	1.845, 6.329	3.44v, 8.20v
53138	3.02	B3 Ia	BRC	3.69, 24.39, 24.44	2.40v, 7.47v
58350	2.45	B5 Ia	BRC	4.7, 6.631	2.10v, 4.52v, 5.67v, 7.72v
74371	5.23	B6 Iab/b	BRC	8.29, 1, 15, 20	3.14v, 5.72v, 7.56v
111973	5.94	B2/3 Ia	BRC	9.536, 57.11	4.00v, 6.50v
75149	5.46	B3 Ia	BRN	1.086, 1.215, 2.214	1.51v, 3.58v, 7.53v
99953	6.57	B1/2 Iab/b	BRN	17.7	2.02v, 3.21v, 4.46v, 8.05v
79186	5.00	B5 Ia	MP		2.27v, 5.84v, 7.82v
80077	9.00	B2 Ia+e	MP	3.119, 21.2, 41.5, 55.5, 66.5, 76	3.77, 5.93v
92964	5.51	B2.5 Ia	MP	2.12, 4.71, 14.71	3.77v, 4.81v, 7.54v

<sup>1</sup>Datos publicados por Haucke et al. (2018) y Haucke (2018).

v indica que el período es variable.

Esto podría sugerir que las pulsaciones de corto período predominan durante esa etapa evolutiva.

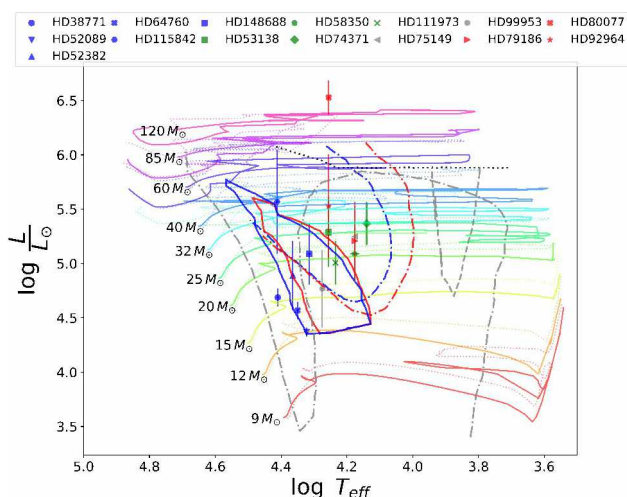


Figura 2: Diagrama HR y caminos evolutivos (con y sin rotación) calculados por Ekström et al. (2012). Se indican, además, los límites de inestabilidad de varios modos de pulsación (ver descripción en el texto). Los colores de las estrellas representan su composición química: normales en azul, BRC en verde, BRN en gris y MP en rojo.

Por lo tanto, es preciso llevar a cabo un estudio minucioso de los distintos patrones de pulsación usando otras herramientas de búsqueda de períodos que hagan uso de, por ejemplo, el algoritmo de Lomb-Scargle para transformadas de Fourier, así como también aplicar modelos astrosismológicos para tener una idea de los fenómenos físicos que dan lugar a estas pulsaciones.

*Agradecimientos:* Agradecemos al árbitro por sus sugerencias y comentarios. Este proyecto ha recibido financiación dentro del marco del Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 (2014-2020) de la Unión Europea en virtud del Acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie No. 823734 y de CONICET (PIP 1337).

## Referencias

- Aerts C., Rogers T.M., 2015, *ApJL*, 806, L33  
Aerts C., et al., 2009, *A&A*, 508, 409  
Bravo J.P., et al., 2014, *A&A*, 568, A34  
Ekström S., et al., 2012, *A&A*, 537, A146  
Glatzel W., 2009, *Communications in Asteroseismology*, 158, 252  
Haucke M., 2018, *Propiedades de los vientos de las estrellas supergigantes B y estado evolutivo*, Ph.D. thesis, National University of La Plata, Argentina  
Haucke M., et al., 2018, *A&A*, 614, A91  
Kraus M., et al., 2012, *A&A*, 542, L32  
Kraus M., et al., 2015, *A&A*, 581, A75  
Mathis S., Neiner C., Tran Minh N., 2014, *A&A*, 565, A47  
Ricker G.R., et al., 2014, J. Oschmann Jacobus M., M. Clampin, G.G. Fazio, H.A. MacEwen (Eds.), *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 9143, 914320  
Roesch A., Schmidbauer H., 2018, *WaveletComp: Computational Wavelet Analysis*. R package version 1.1  
Saio H., 2011, *MNRAS*, 412, 1814  
Saio H., Baker N.H., Gautschy A., 1998, *MNRAS*, 294, 622  
Saio H., Georgy C., Meynet G., 2013, *MNRAS*, 433, 1246  
Saio H., et al., 2006, *ApJ*, 650, 1111  
Simón-Díaz S., et al., 2010, *ApJL*, 720, L174  
Unno W., et al., 1989, *Nonradial oscillations of stars*