

E

VOLUCIÓN ESTELAR EN EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA UNIVERSIDAD SERGIO ARBOLEDA

121

Bianca Basso Ortiz
John Jairo Parra Pérez
Raúl Andrés Joya Olarte

CIVILIZAR

1. INTRODUCCIÓN

La Universidad Sergio Arboleda, siempre preocupada por el fomento y adelanto de la cultura, inauguró el 12 de diciembre de 2000 el Observatorio Astronómico con el telescopio de mejores especificaciones teóricas en Colombia, acompañado por instrumentación y espacios requeridos para la divulgación y la investigación en el campo de la ciencia de la astronomía.

Las labores del Observatorio se han centrado en la divulgación a través de cursos, diplomados y visitas de instituciones educativas (actividades que nos han reportado hasta la fecha visitas de más de 18.000 personas). El tema Astronomía ha despertado tanto interés a todo nivel, que nos hemos dedicado también a apoyar y dirigir jornadas de observación en lugares públicos (incluso fuera de Bogotá), en empresas y en los mismos claustros educativos.

De especial atracción para nuestro público ha sido la asistencia a una de nuestras funciones en el planetario (espacio que contiene un proyector de estrellas y acomodación para 30 personas) en el cual se simula una noche despejada en cualquier latitud de la tierra.

Aunque muy importante, esta labor no era suficiente. Por esto a principios del año 2002 el Observatorio Astronómico inició una nueva etapa al lanzarse de lleno a la investigación de uno de los problemas más interesantes en Astronomía: la toma de imágenes de objetos de cielo profundo, la implementación de procesamiento y reducción de datos y por último, la evolución estelar que es el tema central de este artículo.

Para obtener resultados satisfactorios en una investigación en astronomía observacional, es necesario seguir las siguientes etapas:

- Delimitación del problema, búsqueda de bibliografía, discusión y profundización.
- Escogencia del equipo de trabajo.
- Calibración y toma de datos. Observaciones.
- Procesamiento de datos.
- Análisis y resultados

En algunos casos, como en el nuestro, la investigación incluye una etapa de instrumentación.

Nuestro objetivo en este artículo es ilustrar como se han llevado a cabo las diferentes etapas de este proceso en la investigación que adelantamos actualmente.

2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA Y ESCOGENCIA DEL EQUIPO DE TRABAJO

Al escoger el tema de investigación se tuvieron en cuenta varios factores. El primer factor a considerar fue la ubicación del Observatorio. Por localizarse en el corazón de la ciudad de Bogotá cuya contaminación lumínica y variables condiciones atmosféricas son obvias, los objetos a estudiar debían ser muy luminosos. Por otro lado, el telescopio del Observatorio con sus 16 pulgadas, es apto para la investigación de objetos situados en la galaxia. Por último la arquitectura de la cúpula y el posicionamiento del telescopio nos restringían a cierta región del cielo.

Al considerar los varios proyectos de investigación, se escogió el estudio de las Estrellas Variables Azules (EVAs) por ser estos objetos, por razones que detallaremos más adelante, los que más se ajustaban a las condiciones particulares del Observatorio. El equipo de trabajo debía constar de por lo menos tres personas. Se estableció que la astrónoma Bianca Basso sería la investigadora principal, el ingeniero y especialista en astronomía, Raúl Joya el encargado de la instrumentación y el estudiante de ciencias de la computación John Jairo Parra, el encargado del procesamiento de datos y manejo del telescopio.

2.1 Las EVAs

Las Estrellas Variables Azules, EVAs, son estrellas inestables, luminosas, muy masivas que presentan una clase de variabilidad muy particular

(Humphreys and Davidson, 1994) y que por su clasificación espectral ocupan la parte superior izquierda del diagrama Herzprung –Russel cuando se encuentran en estado de quietud. A pesar de que las EVAs más famosas, Eta Carinae y P Cygnus, han sido observadas por astrónomos desde 1600, solamente fueron definidas como clase por Peter Conti en 1984. Las características que definen las EVAs como clase son las siguientes (Humphreys, 1989, Humphreys and Davidson, 1994, Maeder and Conti, 1994):

2.1.1 Alta Luminosidad Intrínseca. La magnitud bolométrica, M_B , de las EVAs es mayor que $M_B > -9.5$ esto es aproximadamente 10^6 veces mayor que la luminosidad del Sol. La mayoría de las EVAs están muy cercanas al límite de Eddington, esto es al límite superior de luminosidad / masa permitidos por la física para que una estrella pueda existir.

2.1.2 Variaciones fotométricas. Las EVAs presentan variaciones fotométricas de diversas intensidades. En escala temporal oscilante entre cientos y miles de años las EVAs presentan variaciones de 2 o más magnitudes visuales, m_v , con gran pérdida de masa. Después de estas erupciones gigantes la estrella permanece en quietud por un tiempo. Estas variaciones se conocen como máximo. En escala de 10 a 40 años presentan variaciones de 1-2 m_v en la que la luminosidad se mueve del infrarrojo al visible. Es interesante anotar que durante estas erupciones la magnitud bolométrica de la estrella permanece constante (Maeder and Conti, 1994). En escala temporal de meses a años las EVAs presentan pequeñas oscilaciones de hasta 0.5 m_v ; y en escala de meses a días presentan micro variaciones de menos de 0.1 m_v . Estas últimas variaciones se conocen como mínimo.

2.1.3 Características espectrales. Las características del espectro de las EVAs cambian de acuerdo a sus variaciones fotométricas. Cuando la estrella está en una etapa de quietud o mínimo su espectro se asemeja al de las estrellas súper- gigantes calientes con líneas de emisión de H y He I. Algunas EVAs en mínimo tienen espectros como el de las Of/WN9 (Walborn, 1977, Walborn and FitzPatrick, 2000). Cuando las EVAs están activas presentan líneas de emisión de H, He I, FeII [FeII] frecuentemente con perfil P-Cygnus¹. Al máximo el espectro de las EVAs se asemeja al de las estrellas tipo A o F. (Leitherer et al, 1985).

¹ El perfil P Cygnus se caracteriza por tener parte de las líneas de emisión corridas al rojo y parte corridas al azul, es la marca de estrellas envueltas en una nube de material estelar.

2.1.4 Temperatura. Las variaciones espectrales y fotométricas repercuten en la temperatura de las EVAs. Cuando estas se encuentran en quietud o mínimo su temperatura oscila entre los 12,000K y 30,000K siendo también entonces cuando aparecen más luminosas. Cuando la EVA está en un máximo o erupción, la temperatura decrece a los 7000K u 8000 K. Sin embargo hay que ser cautelosos en la aplicación del concepto de temperatura efectiva cuando la EVA está en un máximo, pues la temperatura efectiva se define como una relación entre el radio de la estrella y su luminosidad, y dadas las características físicas de los fuertes vientos estelares y pérdida de masa de la EVA en expansión, hablar de un radio estelar no tiene mucho sentido.

2.1.5 Pérdida de masa. Durante el máximo una EVA puede perder hasta 10^{-5} y 10^{-4} masas solares. Durante el mínimo las ratas de pérdida de masa se asemejan a las de las súper-gigantes normales con la misma temperatura y luminosidad (Lamers, 1989).

Como podemos ver por sus características, las EVAs son estrellas evolucionadas que han abandonado la secuencia principal y aunque pertenecen a una clase muy pequeña de estrellas (por ser tan masivas su vida es más bien breve en términos estelares, por lo tanto se conocen muy pocas) juegan un papel muy importante en la evolución estelar y por su contribución en términos de energía, radiación y poder son motores importantes en la evolución galáctica en general.

Otras estrellas muy masivas que se asocian generalmente con las EVAs son las estrellas Wolf-Rayet, W-R (Ver serie de artículos por Crowter, P.A et al). Desde hace más de 50 años las estrellas W-R se conocen como precursores de explosiones supernova. Son las W-R estrellas muy energéticas que presentan fuertes vientos estelares y por su apariencia espectral asemejan núcleos evolucionados de estrellas masivas. (Maeder and Conti, 1994) Las estrellas W-R se clasifican en subclases de acuerdo con los elementos químicos que presenten en su espectro. En general se dividen en W-R con alto contenido de Nitrógeno (menos evolucionadas) y W-R con alto contenido de Carbono (más evolucionadas). Aunque como se dijo anteriormente las W-R se asocian con las EVAs, la relación evolutiva entre ellas es aún objeto de discusión. El objetivo de la investigación que se adelanta en el Observatorio Astronómico de La Universidad Sergio Arboleda, es justamente determinar esta relación. Más específicamente, determinar el escenario evolutivo, esto es si la EVA es o no precursora de la Wolf-Rayet. Pensamos encontrar líneas de emisión comunes a ambas estrellas para

determinar, de acuerdo a las características de las mismas, cual de las dos estrellas es precursora en el esquema evolutivo.

2.2 Búsqueda de bibliografía, discusión y profundización

Durante dos meses en forma exclusiva se hizo una extensa búsqueda bibliográfica a través del Internet. Se encontraron libros y artículos a los cuales tuvimos acceso bien por estar a disposición de investigadores en general, en sitios de red como el ADS o CDS, o bien a través de contactos en las Universidades de Texas en Austin o de la Universidad de Virginia. A medida que se iba recopilando la información, la investigadora principal la leía y sistematizaba haciendo reuniones semanales con los otros investigadores para ponerlos al tanto y para circunscribir el problema a investigar en parámetros concretos. Al finalizar esta etapa se determinó el objeto de la investigación como el de encontrar relaciones evolutivas desde el punto de vista observacional entre las EVAs y las Wolf-Rayet tal y como se describió en el capítulo anterior. También se decidió cuales EVAs serían el objeto de nuestra observación (Ver tabla 1).

También en esta etapa se establecieron contactos electrónicos con reconocidos investigadores de talla internacional como el Dr. Henny Lamers del SRON Laboratory For Space Research en Utrech, Holanda y Nolan Walborn del STSI, Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA, con el fin de esclarecer y discutir puntos complejos del problema en estudio. Es de anotar que a raíz de estas comunicaciones fuimos invitados a participar en el Simposio Anual de la Unión Astronómica Internacional, IAU, a realizarse en Noviembre de este año en Cancún México.

EVAS GALÁCTICAS

Designación	Ascensión Recta	Declinación
HD 168625	18° 21' 19.54"	-16° 22' 26.05"
HD 168607	18° 21' 14.88"	-16° 22' 31.76"
HD 160529	17° 41' 59.02"	-33° 30' 13.71"

Tabla 1

3. CALIBRACIÓN Y TOMA DE DATOS. INSTRUMENTACIÓN. OBSERVACIONES.

Esta etapa de la investigación fue posible gracias a la colaboración de Benjamín Calvo, de la Universidad Nacional, quien nos facilitó el espectroscopio y Benjamín Oostra de la Universidad de Los Andes quien a su vez nos facilitó la fuente y lámparas espectrales para la calibración. La calibración aunque dispendiosa en términos de tiempo, es indispensable para el investigador pues le permite interpretar correctamente los datos recogidos por los instrumentos.

3.1 Descripción del experimento

Para poder calibrar el espectroscopio y descubrir sus posibles fallas se debe llevar a cabo un experimento que consiste en tomar el espectro de gases cuyas líneas espectrales son conocidas. Los elementos del montaje son: una fuente que da energía a las lámparas de diversos gases, un espectroscopio que difracta la luz de cada lámpara, una cámara CCD² que toma las imágenes que a su vez son leídas en el computador. De esta forma se obtienen imágenes de las líneas de emisión de los gases que posteriormente deben ser identificadas para así poder usarlas en la etapa de procesamiento y reducción de datos. Después de varios intentos, usando el método de ensayo y error, encontramos que las condiciones ideales de este experimento son las siguientes:

- a. Inmovilizar el instrumento con una prensa para evitar vibraciones
- b. Fijar una distancia para localización de los tubos espectrales
- c. Usar la mínima apertura de la rendija de entrada de la luz en el espectroscopio.
- d. Tiempo de exposición de 30 segundos.

3.2 Instrumentación

Como el espectroscopio que estábamos usando fue construido con fines didácticos y no de investigación, se hicieron necesarias algunas modificaciones mecánicas al mismo. Después de varios meses de experimentación, en los cuales buscamos la naturaleza de los problemas presentados por el instrumento que básicamente se manifestaban en espectros fantasmas, determinamos que el espectroscopio necesitaba las siguientes modificaciones:

² La Cámara CCD del OAUSA tiene un tamaño de 512 por 511 pixeles.

- a. Alineación y centrado.
- b. Manufactura de adaptador del espectroscopio al telescopio.
- c. Fijación de la rejilla de difracción para evitar movimientos laterales indeseados.
- d. Fabricación de un dial milimétrico para saber con exactitud la posición de las líneas de emisión en el instrumento.
- e. Manufactura y ajuste de un adaptador del foco.
- f. Sellado de todas las filtraciones de luz.
- g. Limpieza del mecanismo de la rendija de entrada de luz que presentaba filtraciones de agua.

Una vez realizadas las reparaciones mecánicas del instrumento se llevó a cabo la calibración.³

3.3 Observaciones

Con el espectroscopio debidamente calibrado, la noche del 31 de Julio del año 2002, se realizaron las observaciones de las estrellas referidas en la Tabla 1. El montaje de los instrumentos para esta etapa es ligeramente diferente al que debe usarse para la calibración pues el espectroscopio debe adaptarse al telescopio debido a que en el caso de la etapa de observación, el objeto de estudio es la luz que proviene de las estrellas y no de las lámparas de gases.

Antes de apuntar el telescopio a las estrellas objeto de estudio, es necesario realizar las siguientes operaciones: *Sky*, *Dark*, *Flat* y *Bias*. El *Sky* consiste en tomar un espectro del cielo para así poder sustraer del espectro de las estrellas las líneas provenientes de la atmósfera terrestre o líneas telúricas. El *Dark* consiste en tomar imágenes que contengan el ruido térmico producido por las condiciones de temperatura de la CCD. El tiempo de exposición del *Dark* es 30 segundos. Como la sensibilidad a la luz no es la misma en toda la superficie de los chips de la CCD se hace necesario tomar una imagen *Flat* que nos de indicaciones de esta sensibilidad. El tiempo de exposición del *Flat* varía entre 0.01 y 5 segundos, dependiendo de la intensidad e la luz. El *Bias*, por último, consiste en sustraer de la imagen el ruido generado en el instrumento mismo. El tiempo de exposición del *Bias* es 0 segundos. Durante una observación astronómica se deben tomar varias imágenes de *Bias* y *Dark* durante la noche. Para nuestra observación se tomaron 12 imágenes de *Bias*, 10 imágenes de *Dark* y 10 imágenes de *Flat*.

³ Para detalles específicos este proceso, favor referirse a los informes periódicos presentados a CIVILIZAR por el equipo de trabajo del OAUSA.

Los espectros de las estrellas listadas en la Tabla 1 se tomaron con una exposición de 30 segundos. Se tomaron dos imágenes por cada posición de dial, para barrer la totalidad del espectro electromagnético. Sin embargo, dadas las especificaciones de la rendija de difracción y de la cámara CCD, las mejores imágenes obtenidas corresponden al rojo en el espectro y serán aquellas que usaremos para la reducción y análisis de datos.

4. PROCESAMIENTO Y REDUCCIÓN DE DATOS

El procesamiento y reducción de datos consiste en retirar de las imágenes aquella señal que no es proveniente del objeto a estudiar (Joya y Parra, 4^{to} Simposio de Astronomía Computacional Y Astrofísica). Existen muchos programas que realizan este proceso, pero una de las aplicaciones más robustas es IRAF (Image Reduction and Analysis Facility).

El IRAF es un software que contiene paquetes, los cuales tienen tareas específicas, cada una de estas tareas permite realizar diversas funciones a las imágenes. En el caso que nos ocupa usamos las siguientes tareas⁴:

1. Substracción de *Bias*
2. Substracción de *Dark*
3. División por *Flat*

Una vez efectuadas estas tareas generales para sustraer errores de las imágenes se deben hacer calibraciones en longitud de onda y de flujo.

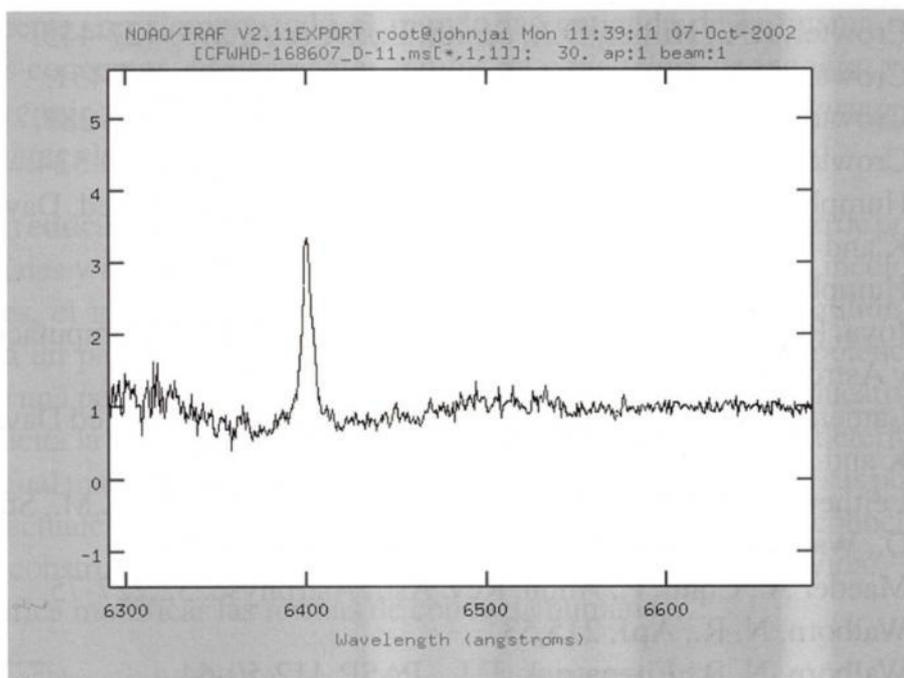
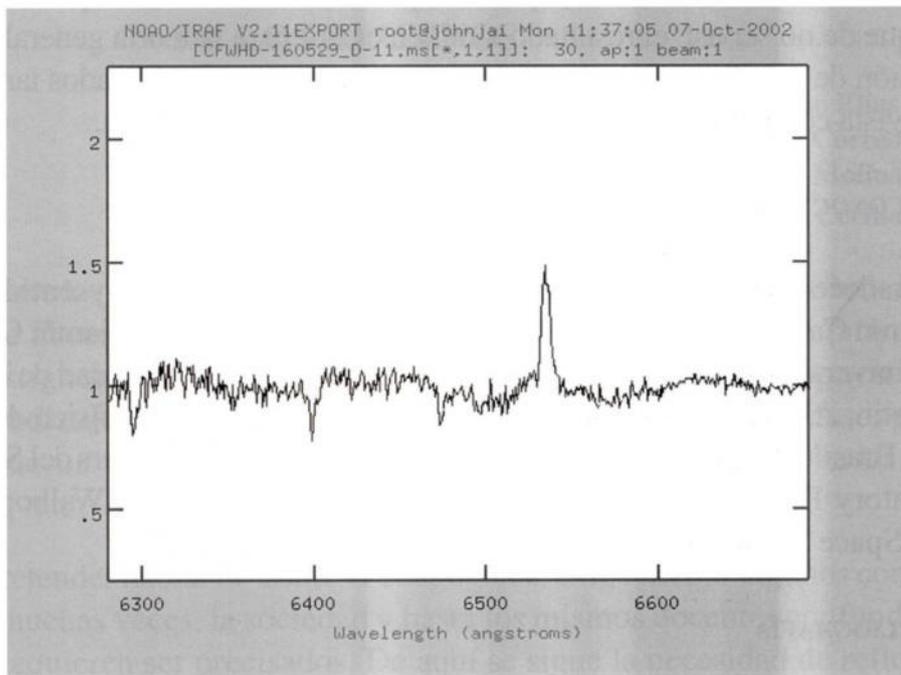
4.1 Calibración por longitud de onda

Esta tarea tiene dos etapas. La primera consiste en extraer los espectros de las imágenes previamente corregidas y las de las lámparas de calibración. La segunda tarea consiste en la calibración por longitud de onda propiamente dicha. Para esto se usan las imágenes de las lámparas de gases obtenidas en la etapa de calibración cuyas líneas espectrales han sido previamente identificadas. Esta información se introduce al IRAF que la aplica a los espectros de los objetos de estudio y finalmente transforma la medida de píxeles a ángstroms.

4.2 Calibración de flujo

Después de haber calibrado en longitud de onda, se debe calibrar el flujo, para esto se debe hallar la masa de aire entre el observador y la atmósfera y

luego se elige una estrella estándar de la base de datos que posee el IRAF para usar los datos de su flujo de energía. En la gráfica 1 podemos apreciar uno de los espectros reducidos por el OAUSA. La primera imagen corresponde al espectro de emisión de la estrella HD 160529, en la región de de 6200 a 6700 ángstrom. La segunda gráfica corresponde a la calibración de flujo para la misma zona.



5. ANÁLISIS DE DATOS. RESULTADOS

Durante esta etapa, la cual está por iniciarse, analizaremos los datos procesados y trataremos de probar nuestra tesis inicial de que las EVAs son precursoras de las Wolf-Rayet. El procedimiento consiste en comparar las líneas de emisión de los espectros tomados en casa con aquellas de espectros conocidos y publicados de estrellas W-R. Esperamos probar nuestra tesis, aunque tenemos claro que de no ser así, el resultado también es útil para la teoría general de la evolución de estrellas masivas. Nuestros resultados serán publicados tanto en esta revista como en publicaciones especializadas en Astronomía.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de las siguientes personas y entidades: Benjamín Calvo, de la Universidad Nacional de Colombia, Benjamín Oostra de la Universidad de los Andes, Shizuka Akiyama de la Universidad de Texas en Austin, Alberto Rodríguez del Instituto Astronómico y Geofísico de Sao Paulo, Brasil y Universidad Nacional de Colombia, Henny Lamers del SRON Laboratory For Space Research en Utrech, Holanda y Nolan Walborn del STSI, Space Telescope Science Institute.

BIBLIOGRAFÍA

1995. Crowter, P.A., Hillier, D.J., Smith, L.J., A & A, 293, 403-426.
1995. Crowter, P.A., Hillier, D.J., Smith, L.J., A & A, 293, 427-445.
1995. Crowter, P.A., Hillier, D.J., Smith, L.J., A & A 302, 457-451.
1995. Crowter, P.A., Hillier, D.J., Smith, L.J., A & A. 304, 296-283.
1995. Crowter, P.A., Hillier, D.J., Smith, L.J., A & A. 320, 500-524.
1989. Humphreys, R. M., Physics of LBVs, IAU Colloq. 113, ed. Davison, K and Moffat, A.F.J.
1994. Humphreys, R. M., Davison, K., PASP.106.1025H.
2002. Joya, R.A., y Parra, J.J., 4^{to} Simposio de Astronomía Computacional y Astrofísica. Ponencia.
1989. Lamers, H.J.G.L.M., Physics of LBVs, IAU Colloq. 113, ed Davison, K and Moffat, A.F.J.
1985. Leitherer, C., Appenzeller, I., Klare, G., Lamers, H.J.G.L.M., Sthal, O., Wateres, LBFM and Wolf, B., A & A, 153,158.
1994. Maeder A., Conti, P., Annu. Rev. Astr. Astrphysc. 32,227-75.
1977. Walborn, N. R., ApJ, 215,53.
2000. Walborn, N. R., Fitzpatrick, E.L., PASP, 112:50-64.