



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Identificación de objetos jóvenes en placas astronómicas
antiguas

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Hugo Sánchez Aragón

Asesorado por

Dr. Raúl Mújica García

Puebla Pue.

14 de noviembre de 2025



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Identificación de objetos jóvenes en placas astronómicas
antiguas

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Hugo Sánchez Aragón

Asesorado por

Dr. Raúl Mújica García

Puebla Pue.

14 de noviembre de 2025

Título: Identificación de objetos jóvenes en placas astronómicas antiguas

Estudiante: HUGO SÁNCHEZ ARAGÓN

COMITÉ

Ana Aurelia Avilez López
Presidente

Rosibel Carrada Legaria
Secretario

José S. Guichard Romero
Vocal

Agustín Márquez Limón
Vocal

Dr. Raúl Mújica García
Asesor

Enrique Varela Carlos
Asesor interno

Índice general

1. Introducción	5
1.1. Tonantzintla y su colección de placas astronómicas	5
1.2. Mapeos de estrellas jóvenes	7
1.2.1. Población de Orión	8
1.3. Evolución estelar	8
1.4. Formación estelar	9
1.5. Estrellas jóvenes	11
1.5.1. Estrellas T Tauri	11
1.5.2. Estrellas Ae/Be de Herbig	11
1.6. Clasificación espectral	12
2. Selección de la muestra y observaciones	13
2.1. Tres regiones de formación estelar	13
2.1.1. Casiopea	13
2.1.2. Vela	14
2.1.3. Escorpión	14
2.1.4. La placa astronómica con la muestra de estrellas a estudiar	14
2.2. Las observaciones	14
3. Procesado de datos	19
3.1. Procesado estándar	19
3.2. Extracción y calibración	21
4. Discusión y resultados	27
4.1. Corrección en algunas identificaciones	27
4.2. Resultados	28
4.2.1. Objetos individuales	28
4.2.2. Estrellas tipo B	42
4.2.3. Estrellas M	42
4.2.4. Estrella tipo espectral S	43
4.2.5. Estrella T Tauri	43
5. Conclusiones	45
5.1. Trabajo a futuro	46
A. Placa original del OANTON	47
B. Espectros de comparación	49
C. Modelo rotacional de Struve	59

Dedicatoria

A Elena y a Eugenio, por quienes amo las letras.

A Irma y a Arturo, por quienes disfruto el sazón de la vida.

A Hugo, por quien volteo hacia las estrellas.

A Gabriela, quien me enseñó a no voltear hacia abajo indiferente.

Y a Paula y a Manuel, por quienes resisto y lo intento.

A todos ustedes, quienes me dieron forma y por quienes vivo.

Resumen

La colección de placas astronómicas del INAOE, obtenidas principalmente con la Cámara Schmidt, ha sido una gran contribución de México para la comunidad astronómica mundial. Estas placas se ubican en el acervo del INAOE, el cual cuenta con más de 15 mil placas resguardadas en un espacio diseñado especialmente para su correcta preservación. Aunque al día de hoy las placas astrofotográficas han sido superadas por los detectores electrónicos y se consideran obsoletas, aún es posible utilizarlas para llevar a cabo algunas investigaciones en varios campos de la Astronomía. Tal es el caso del trabajo de Márquez-Limón et al. (1992), quienes llevaron a cabo una búsqueda de objetos con posible emisión en la línea de $H\alpha$ en regiones de formación estelar localizadas en la dirección de las constelaciones del Escorpión, Vela y Casiopea, presentando una lista de candidatos a miembros de la población estelar joven de Orión. En este trabajo se presenta el resultado del estudio espectroscópico de los objetos localizados en la región de Casiopea, con la finalidad de confirmar si se trata de objetos jóvenes. Para ello se llevaron a cabo observaciones con el telescopio de 2.12 m del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) ubicado en Cananea, Sonora, utilizando dos espectrógrafos: un Boller & Chivens y un reductor focal, denominado LFOSC. Se explica a detalle el proceso realizado para obtener los espectros de los objetos, la reducción de los datos obtenidos, y el análisis de los mismos. Se confirma que la mitad de ellos presentan $H\alpha$ en emisión y están posiblemente asociados con la llamada población estelar joven de Orión. Sin embargo, la otra mitad de la muestra estudiada resultaron ser estrellas tardías, sin $H\alpha$ en emisión, por lo que también proponemos una explicación para esta confusión en la selección original.

Capítulo 1

Introducción

El repositorio de placas astronómicas de Tonantzintla ha sido, hasta el día de hoy, de gran importancia para la comunidad astronómica; tanto para llevar a cabo mapeos del cielo, identificando diferentes tipos de objetos (estrellas ráfaga, objetos azules, etc.), como un registro histórico que sirve de referencia hasta la fecha para comparar con observaciones recientes. Además, aún es posible explorar estas placas y encontrar nuevos resultados, por ejemplo, en el caso de las llamadas placas $H\alpha$, hace unos años se revisaron placas de regiones de formación exploradas en los años 1960 por astrónomos del OANTon. En este trabajo de Márquez-Limón et al. (1992) [23], se seleccionaron probables miembros de la población de Orión, es decir, estrellas con probable $H\alpha$ en emisión, lo que implicaría que son jóvenes, ya que se localizan en regiones de nubes oscuras. Para determinar con total certeza si estos objetos son jóvenes, debe demostrarse claramente que presentan $H\alpha$ en emisión, así como otras características espectrales. La única manera de lograrlo es obteniendo el espectro de cada uno de ellos. Por esta razón es que se llevaron a cabo observaciones en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH). Posteriormente, se realizó el análisis de sus líneas de emisión; en particular, buscando la emisión en $H\alpha$, ya que este es uno de los indicadores de que las estrellas son jóvenes. Por último, se les fue asignado un tipo espectral a cada una de las estrellas observadas. En este capítulo se presentan los detalles de la colección de placas y las características de las estrellas jóvenes.

1.1. Tonantzintla y su colección de placas astronómicas

El Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla (OANTON) fue fundado en el año de 1942 y sentaría las bases para lo que ahora es el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), el cual es de importancia histórica debido a que representó la entrada de México a la astrofísica moderna.

Entre las muchas herramientas e infraestructura que tiene a su disposición el INAOE, existe el repositorio de placas astronómicas que contiene una colección de 15,686 placas de las cuales, más de 10 mil fueron tomadas con la ayuda de la Cámara Schmidt (ubicada también en el INAOE, en Tonantzintla). En este acervo existen diferentes tipos de placas, dependiendo de la técnica que se utilizó, principalmente se dividen en placas directas y espectroscópicas.¹

Estas placas son el resultado del mapeo de diversas regiones del cielo, es decir, de registrar la mayor cantidad de objetos en luz visible en un área determinada. Esto se lograba gracias a distintas técnicas, lo que generó distintos tipos de placa. También es importante la emulsión con la que se recubrían estas placas, ya que son sensibles para diferentes intervalos de frecuencias. Por otro lado, al colocar el prisma objetivo, el cual difracta la luz, en el extremo de la Cámara, se obtienen espectros y si se colocan además filtros especializados, era posible detectar solo un intervalo de

¹Recuperado de la página oficial del INAOE [17]

longitud de onda muy específico. Con todas estas posibilidades, la colección de placas ha sido de suma importancia para la investigación astronómica desde el momento en el que se comenzaron a utilizar y hasta la fecha, al usarlas de referencia.

Las placas astronómicas son de vidrio y miden 20 cm×20 cm, están recubiertas de una emulsión fotosensible para exponerla a una región del cielo con ayuda de algún instrumento. Cubren un área de alrededor de 25 grados cuadrados en el cielo, lo cual, aproximadamente, equivale a 10 × 10 lunas llenas. Existen distintas emulsiones, las cuales reaccionan a los fotones que inciden en ellas de manera similar al funcionamiento de las películas fotográficas; cada emulsión es sensible a distintos intervalos de longitud de onda. Estas placas, así como los reactivos, eran fabricadas principalmente por la compañía Eastman Kodak.

Como ya se mencionó, estas placas se pueden obtener exponiéndolas de forma directa (con algún filtro) o espectroscópica (con ayuda de un prisma objetivo o algún otro elemento que disperse la luz del objeto observado). Adicionalmente, según la investigación de Díaz (2005) [10], también se utilizaba un filtro centrado en una longitud de onda específica, la cual variaba dependiendo de las necesidades de cada observación.

Para el caso de placas en $H\alpha$, se utilizaba la emulsión 103a-E, la cual tiene una respuesta efectiva hasta los 7000 Å, combinada con un filtro Wratten 2-29; el cual corta toda la luz con longitud de onda menor a 6000 Å. Esto provoca que el intervalo resultante que registra la placa esté aproximadamente entre los 6000 y 7000 Å, justo el intervalo en el que se localiza la línea de $H\alpha$, cuya longitud de onda es de 6563 Å.

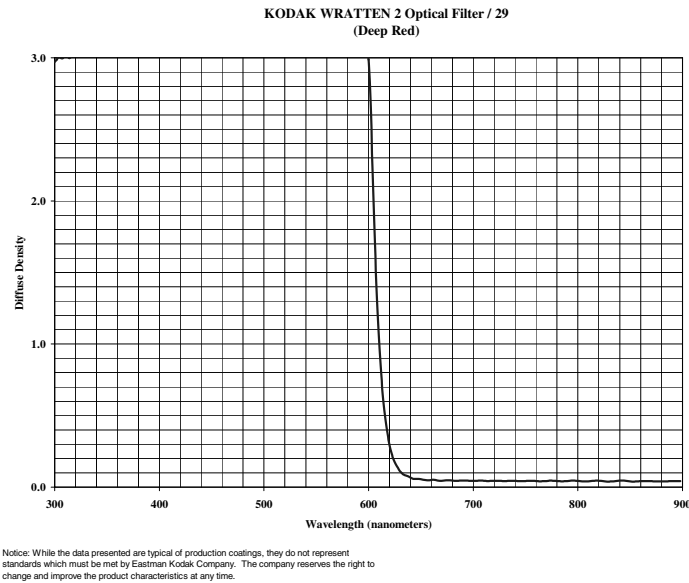


Figura 1.1: Gráfica de densidad de difusión del filtro W2-29

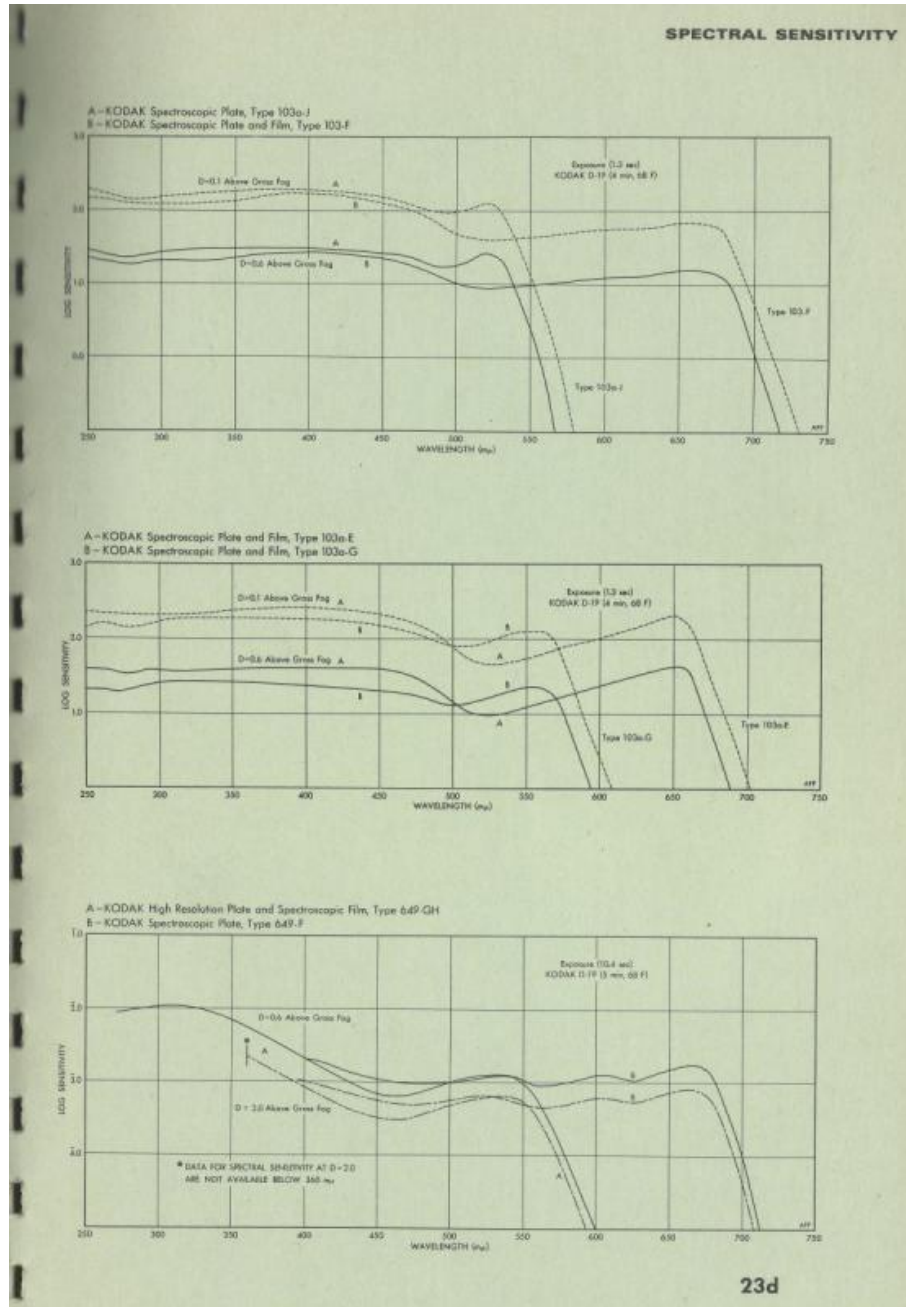


Figura 1.2: Gráfica de respuesta de la emulsión 103a-E (en el panel medio), similar a la utilizada en las placas espectroscópicas de Tonantzintla.

1.2. Mapeos de estrellas jóvenes

El trabajo realizado en Tonantzintla con placas astronómicas es de gran importancia debido a que se sentaron las bases para investigaciones posteriores en el entendimiento de distintas ramas de la astrofísica; entre ellas, la formación estelar. Estas se centran en distintos objetos y regiones del cielo; sin embargo, el uso de estas también ha sido de gran ayuda para conocer regiones en donde la formación de estrellas es más abundante. Los mapeos de estrellas jóvenes se complementan a

su vez con otro tipo de placas llamadas placas espectroscópicas, de las cuales se puede extraer información como la composición química de las estrellas, la temperatura, su tipo de emisión y una estimación de la edad de las mismas.

Un ejemplo de este tipo de investigación es el trabajo realizado por Haro (1972) [15], en el que se aprovechan este tipo de placas espectroscópicas para seleccionar candidatas a estrellas jóvenes, con base en la presencia de la línea del hidrógeno $H\alpha$ en emisión.

Originalmente, los investigadores inspeccionaban minuciosamente cada placa y seleccionaban las que eran candidatas a ser estrellas jóvenes debido a características presentes en la placa, conociendo el tipo de filtro con el que se había tomado esta última. Esto también funcionaba debido a que las regiones en donde se seleccionaban dichos objetos no eran tomadas al azar, sino que se seleccionaban por estar cerca de nubes moleculares, en donde se sabe que la formación estelar es activa.

1.2.1. Población de Orión

Una definición temprana de esta población fue dada por Herbig (1962) [15] la cual indica que son objetos Ae/Be, objetos inusuales de tipo F y con magnitud fotográfica $M_{pg} = +4$ en la Secuencia Principal; sin embargo, posteriormente se incluyeron las estrellas pre-secuencia principal de todas las luminosidades con y sin líneas de emisión, las cuales se encuentran en nubes moleculares, cúmulos, grupos o cercanas a estos.

1.3. Evolución estelar

Las estrellas tienen su proceso de vida y muerte: nacen, pasan la mayor parte de su vida en la Secuencia Principal y después mueren. Comienzan su vida dentro de nubes de gas y polvo cuyos componentes interactúan, principalmente debido a la presión y a la gravedad, de tal manera que cuando una región de esta nube se hace lo suficientemente densa y masiva como para que la fuerza de la gravedad rompa el equilibrio en que se encontraba, el material inicia un proceso de contracción que se detiene al crearse un núcleo en cuyo interior se genera energía que calienta el gas, aumenta la presión y equilibra la gravedad. Este proceso se repite varias veces, hasta que se genera una protoestrella, la cual continúa absorbiendo material hasta que “limpia” sus alrededores o el espacio cercano a donde se encuentra. En este punto, la estrella recién nacida se sitúa en la llamada secuencia principal del diagrama de Hertzsprung-Russell (también conocido como *diagrama H-R*, ver figura 1.3), en esta región se localizan las estrellas en cuyo núcleo se está generando energía mediante reacciones termonucleares, transformando hidrógeno en helio.

El diagrama H-R relaciona la luminosidad de una estrella con su temperatura, en el cual se pueden ubicar las estrellas con estos parámetros determinados. Una región de este diagrama es conocida como la **secuencia principal**, donde la mayor parte de las estrellas formadas y estables están situadas. La secuencia principal es la sección donde todas las estrellas pasan la mayor parte de su vida, ya que están consumiendo hidrógeno como su principal fuente de combustible, a través de la fusión nuclear, donde se convierte el hidrógeno en núcleos de helio, liberando energía, la misma que mantiene brillando a las estrellas.

Al estar cerca de consumir todo el hidrógeno en el núcleo, el equilibrio hidrostático de una estrella, en el cual las fuerzas de gravedad y presión se encuentran balanceadas, se rompe, y la presión dentro de ella es tanta que comienza a aumentar su tamaño y a disminuir su temperatura, moviéndose a la zona de gigantes, dentro del diagrama H-R, en donde, dependiendo de la masa de la estrella, evolucionará hacia distintos objetos, como una nebulosa planetaria o una supernova. Ya que este trabajo no se centra en la parte de secuencia principal ni en el final de las estrellas, se pondrá especial atención en sus inicios.

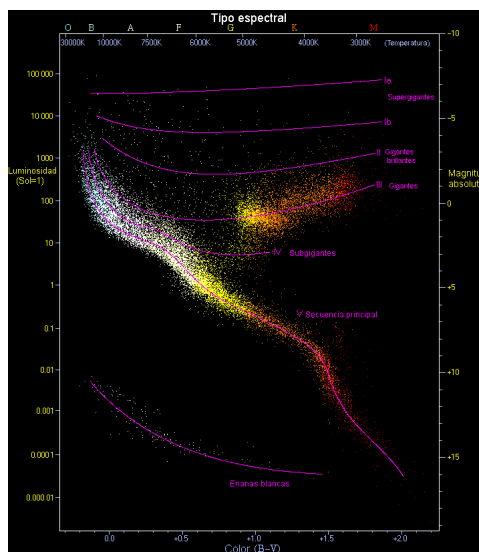


Figura 1.3: Diagrama H-R, [28]

1.4. Formación estelar

El proceso por el que nace una estrella ha sido estudiado a lo largo de los años, sin embargo, a pesar de los siglos de estudio, el tiempo de investigación es insignificante comparado al tiempo de vida de una estrella. Las observaciones realizadas no han sido más que “un instante” en el proceso de formación y en general en la vida de la estrella. A manera de comparación, únicamente vemos una “fotografía” de la vida de estos objetos. Sin embargo, al tener una inmensa cantidad de objetos similares, cada uno en diferentes momentos de su evolución, se pueden crear modelos e incluso establecer el comportamiento de cada estrella sin necesidad de esperar millones de años.

El proceso de formación estelar comienza en las nubes moleculares, regiones con alta densidad de material interestelar, el cual está compuesto en gran parte de moléculas y átomos de elementos como el hidrógeno y el helio, o elementos que provienen de explosiones de estrellas, las cuales han enriquecido el medio interestelar con litio, berilio, etc. Este material comienza a colapsar debido a la interacción gravitacional entre los átomos. En caso de que la nube tenga carga neutra, el colapso seguirá hasta que entre en la siguiente fase. Sin embargo, rara vez ocurre esto, es más común que las nubes moleculares presenten carga y que exista un campo magnético que impida el colapso. Las moléculas de elementos presentes en estos objetos son constantemente bombardeadas por rayos cósmicos, radiación proveniente de distintos medios y hay interacciones entre las propias moléculas; de este modo es como reciben energía y se calientan, además, están rotando, probablemente debido a la rotación de la Galaxia. Al estar rotando, las líneas de campo magnético presentan una torsión entre sí (tal y como lo haría un cable al torcerse). Dicha torsión llega al punto en el que las líneas de campo magnético no pueden mantenerse entre sí, entonces se rompen.

Una vez rotas las líneas de campo, la nube colapsa y la energía potencial gravitacional se convierte en energía térmica y radiación, la cual se propaga en un inicio libremente a través del material, debido a su baja densidad. La mayor parte de esta energía es radiada fuera de la nube, por lo que la temperatura no incrementa y el gas cae libremente hacia el centro. La interacción gravitacional entre las moléculas comienza a juntar material gradualmente, aumentando la densidad hasta que llega el punto en el que el material comienza a interactuar en un espacio reducido y la gravedad continúa acumulando moléculas. La densidad en el centro de la nube aumenta y una gran parte de la energía liberada se convierte en calor y la temperatura incrementa, provocando también un aumento en la presión. Esto, a su vez, provoca una resistencia a la caída del material.

Debido a que este núcleo consiste principalmente de hidrógeno molecular, al alcanzar la temperatura de 1800 K , las moléculas de hidrógeno se disocian en átomos, se consume energía y el incremento de temperatura se ralentiza, así como la presión. Es debido a esto que la tasa de contracción de material aumenta. Este ciclo se repite varias veces; cuando el hidrógeno se ioniza a los 10^4 K , cuando el helio está ionizado y a los 10^5 K , cuando todo el gas está esencialmente ionizado, es entonces que la contracción se detiene y la estrella se sitúa en un equilibrio hidrostático.

Este ciclo se repite muchas veces hasta que la estrella es lo suficientemente masiva como para comenzar los procesos nucleares en su interior. Pero antes de llegar a ese punto, las interacciones del material con la estrella continúan como una nube en forma de cascarón. (Karttunen et al., 2006) [20]

En el modelo estándar de Shu, Adams y Lizano (1987) [31], se resume la formación estelar en cuatro etapas a partir de una nube molecular de lenta rotación y en un estado cercano al isotérmico.

En la **primera etapa**, se consideran *grumos* dentro de la nube, los cuales se forman dependiendo de la masa de la nube y la repercusión que tiene el campo magnético en ésta; si la nube es menos masiva, las partículas menos atraídas colapsan entre sí debido a lo que se conoce como *difusión ambipolar* que no es más que el escurrimiento de partículas neutras entre las ionizadas. Por otro lado, si la nube tiene una masa mayor, el colapso tomará lugar en toda la nube debido a que el campo magnético no es capaz de evitar que el sistema colapse.

Posterior a esto, en la **segunda etapa**, los grumos colapsan y se da lugar a la formación de una protoestrella central y un disco de acreción, envueltos en gas y polvo, el cual sigue cayendo radialmente hacia el disco. En este punto, la transferencia de energía es meramente convectiva; y sumada a la velocidad diferencial de la estrella, ocasiona que el sistema expulse material hacia fuera de la nube. Sin embargo, debido a la caída del material proveniente del envoltente, esta expulsión no puede ser libre, ya que hay una presión que se opone.

Esto prevalece hasta la **tercera etapa**, en la que suficiente material cae al disco y la expulsión de material abarca toda la estrella hasta la **cuarta etapa** en la cual se inhibe dicha caída de material y se revela una estrella recién formada con un disco circunestelar. [25]

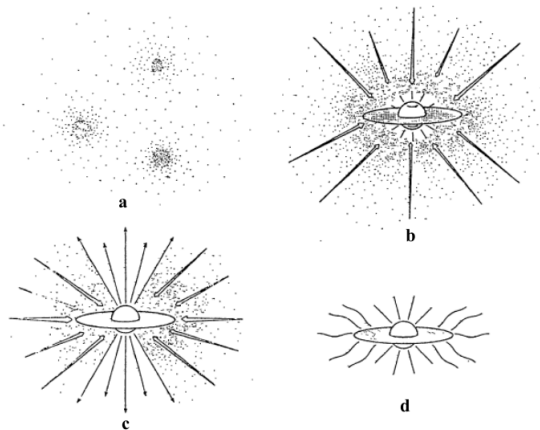


Figura 1.4: Etapas de la formación estelar

Discos y jets

Una vez que la protoestrella está formada, la caída de material continúa hacia el centro, del mismo modo que sucede en las fases iniciales de dicho objeto; sin embargo, debido a que el sistema está rotando, ya sea por las fuerzas implicadas en el comienzo de la formación o en el transcurso de ésta, la conservación del momento angular provoca que dicho material se aleje de los polos y se

concentre en el ecuador del objeto, causando que la luminosidad del objeto aumente y formando lo que se conoce como “disco de acreción”. A su vez, el campo magnético de la estrella conduce parte del material a lo largo de las líneas de campo mientras se acelera y finalmente es expulsado en los polos, formando así lo que se conoce como un *jet*.

1.5. Estrellas jóvenes

A lo largo de la vida de una estrella, podemos definir distintas fases en las que se encuentran gracias a sus mecanismos con los que están interactuando su propio sistema. Debido a esto, podemos asociar diferentes momentos como nacimiento, evolución y muerte de una estrella con sus distintas características. En las primeras fases de formación, concretamente desde que el brillo de una estrella es visible a través de la nube de material que lo rodea hasta que la estrella comienza su fase dentro de la secuencia principal, se le puede denominar como “*estrella joven*”, la cual presenta ciertas características que nos permiten saber que está recién formada, como en el caso de los tipos de estrellas siguientes:

1.5.1. Estrellas T Tauri

Las estrellas T Tauri, nombradas así debido a la estrella variable T en la constelación de Tauro, son estrellas jóvenes de alrededor de menos de 10^7 años, con masas menores a 3 veces la masa del Sol (M_{\odot}). Estos objetos fueron definidos por primera vez por Herbig (1962) [14] quien enlistó una serie de criterios espectroscópicos principales, entre los cuales se tiene la presencia de las líneas de hidrógeno y Ca II en emisión, líneas fluorescentes en Fe I $\lambda\lambda$ 4063.4132 (las cuales sólo han sido encontradas en estrellas T Tauri), líneas de Li I 6707 en absorción. Adicionalmente, estos objetos siempre se encuentran en regiones de nubes moleculares o muy cercanas a ellas. Bastian et al. (1983) [2] hacen hincapié en la extensa lista de criterios para nombrar a un objeto una estrella T Tauri, por lo que proponen una definición más breve y concisa: “*Objetos estelares asociados con regiones oscuras; en su espectro exhiben líneas de Balmer de hidrógeno y líneas de CaII H y K en emisión, ancho equivalente con H α siendo por lo menos 5 Å. No existe un espectro de absorción fotosférico de supergigante o de tipo temprano (más temprano que F tardío)*”. [1] [2]

1.5.2. Estrellas Ae/Be de Herbig

Las estrellas Ae/Be de Herbig son estrellas jóvenes de mediana masa situadas en la pre-secuencia principal, caracterizadas por exceso en el infrarrojo y líneas de emisión presentes.

De acuerdo con Bastian et al. (2003) [2]; estas estrellas, descubiertas por G. H. Herbig en la década de 1960, presentan una serie de características, algunas de ellas similares a las de las estrellas T Tauri; sin embargo, este tipo de objetos es de mayor masa.

Algunas de las características de estos objetos son las siguientes:

- Masa de entre 2 y $10 M_{\odot}$.
- Edad menor a los 10 millones de años.
- Presentan la serie de Balmer en sus líneas de emisión, así como otras líneas características de estrellas jóvenes.
- Exceso de emisión en el infrarrojo debido a la presencia de envoltentes.
- Se sitúan cerca de nubes moleculares.

1.6. Clasificación espectral

Una de las distintas maneras de clasificar estrellas es basándose en su espectro visible, el cual se obtiene al dispersar su luz en este intervalo de frecuencias. Los parámetros en los que se basa esta clasificación están incluidos en el sistema de clasificación de Harvard, el cual toma en cuenta distintos factores para asignar un tipo estelar.

Uno de los factores importantes a la hora de clasificar es la intensidad de las líneas de absorción presentes en el espectro de una estrella, entre las cuales destacan la serie de Balmer del hidrógeno, el elemento presente y más abundante en todas las estrellas. Adicionalmente, la temperatura y la presencia de líneas espectrales provenientes de otros elementos son tomadas en cuenta para conocer su clasificación, debido a las condiciones físicas que implica mostrar estas características.

La clasificación de Harvard es una secuencia de temperatura. Cada uno de los tipos espectrales es representado por una letra y un número del 0 al 9 (con excepción de las estrellas O), en donde el 0 es el más caliente y el 9 el más frío. Las letras en orden de la mayor a la menor temperatura son:

O, B, A, F, G, K, M.

Karttunen et al. (2017) [20] señalan que existen estrellas tipo S, las cuales son gigantes que contienen aproximadamente la misma cantidad de oxígeno y carbono en su superficie. También, estrellas tipo C, las cuales son estrellas de carbono. Estos tipos espectrales son considerados especiales; sin embargo, también entran dentro de la clasificación de Harvard.

En esta tesis se analizaron los espectros de 13 estrellas, en la dirección de Casiopea, marcadas previamente como candidatas a estrellas jóvenes; basados principalmente en la posibilidad de la presencia de la línea $H\alpha$ en emisión, ya que dicha característica es fuerte evidencia de una estrella joven. Una parte importante del proceso de identificación de estrellas jóvenes es conocer su tipo espectral, por lo que se ha hecho una clasificación espectral a cada una de ellas, y de esta manera conocer si pertenecen a algún grupo de objetos jóvenes, como lo son las estrellas T Tauri, YY Orionis, Ae/Be de Herbig, entre otros.

La estructura de esta tesis es como sigue: en el Capítulo 2 se describe cómo se seleccionó la muestra de estrellas que se estudió y las observaciones llevadas a cabo; en el Capítulo 3, se explica el proceso de reducción de imágenes. Posteriormente, en el Capítulo 4, se analizan y se discuten los hallazgos para cada uno de los objetos de estudio. Finalmente, en el Capítulo 5, se elaboran las conclusiones.

Capítulo 2

Selección de la muestra y observaciones

Este trabajo está centrado en un grupo de objetos que fueron seleccionados como candidatos a estrellas jóvenes y que tuvieran la posibilidad de ser observados desde el OAGH en Cananea, Sonora. En este capítulo se justifica el porqué de la selección de esta muestra, así como las herramientas que se utilizaron para llevar a cabo las observaciones.

2.1. Tres regiones de formación estelar

La formación estelar en nuestra galaxia, la Vía Láctea, está concentrada en el plano de la misma. En la región donde se localizan los brazos espirales y se concentra una gran cantidad de gas, de nubes moleculares, dentro de las cuales se forman las estrellas. Por esta razón, los astrónomos de Tonantzintla escogieron regiones sobre el plano galáctico para mapear con la Cámara Schmidt y buscar estrellas con $H\alpha$ en emisión, uno de los indicadores de juventud, tal como lo hicieron González y González (1954) [11]. Se publicaron una gran cantidad de artículos con listas de candidatas, muchas de ellas posteriormente confirmadas por otros observadores como estrellas jóvenes y que les hicieron estudios detallados de seguimiento. Sin embargo, no todas las estrellas fueron marcadas en las placas, por lo que en épocas posteriores, se hicieron revisiones de las mismas, tal es el caso del trabajo de Márquez-Limón et al. (1992)[23]

En dicho artículo, se presentaron listas de candidatos a la población de Orión seleccionados en placas de Tonantzintla que habían sido obtenidas en tres regiones localizadas en el plano de la galaxia, asociadas, desde luego, a regiones de formación estelar. Dichos objetos fueron marcados y clasificados con emisión fuerte (*s*), débil (*w*) o probable (*p*) dependiendo de la intensidad de la emisión hallada en $H\alpha$. Cabe aclarar que esta identificación y clasificación fue asignada con la ayuda de un microscopio y basándose exclusivamente en la experiencia del investigador mencionado para identificar objetos con emisión en una placa espectroscópica.

A continuación se presentan las tres regiones estudiadas del artículo mencionado, cada una con sus características:

2.1.1. Casiopea

La placa estudiada fue la marcada como **AC 2845**, centrada en $\alpha = 00^h53^m$ $\delta = +59^\circ45'$. Expuesta durante 10 minutos la noche del 25/26 de noviembre de 1952.

En esta placa se marcaron 13 objetos: 7 marcados como *s*, 2 con *w* y 4 con *p*.

2.1.2. Vela

Para esta región se estudió la placa **AC 3848**, centrada en las coordenadas $\alpha = 08^h 35^m$, $\delta = -42^\circ 30'$, tomada la noche del 26/27 de enero de 1954 con una exposición de 60 minutos.

En esta región se reportaron 17 objetos marcados con probabilidad de emisión en $H\alpha$; 4 marcados como *s*, 5 como *w* y 8 como *p*. Debido a las coordenadas de la región, esta fue descartada para darle seguimiento a los objetos, ya que se encuentra muy al sur y no es accesible desde el OAGH.

2.1.3. Escorpión

La región estudiada se localiza en la placa **AC 3973**, centrada en $\alpha = 16^h 14^m$ $\delta = -15^\circ 35'$, observadas durante la noche del 29/30 de marzo de 1968, con un tiempo de exposición de 15 minutos. Se reportaron 13 objetos: 2 marcados como *s*, 6 como *w* y 5 como *p*.

Aunque esta región ya es visible desde Cananea en ciertas épocas del año, se descartó usarla debido a que se tendría que esperar la época correcta para que alcance la altura necesaria, ya que sólo está disponible, en condiciones óptimas, durante una parte de la noche.

2.1.4. La placa astronómica con la muestra de estrellas a estudiar

Como se puede observar, la región de Casiopea es la que contiene el mayor número de estrellas marcadas como fuertes candidatas (*s*), además, esta región es visible durante todo el año desde el OAGH y a buena altura durante gran parte de la noche. Por esta razón, los objetos estudiados en este trabajo fueron seleccionados de esta placa en $H\alpha$ AC 2845, con una emulsión 103 a-E (rango de sensibilidad efectiva de 550-660 nm) en conjunto con un filtro Wratten 2-29, centrada en las coordenadas $\alpha=0:53:00$ $\delta=+59:45:00$, expuesta durante 10 minutos en noviembre de 1952 desde el OANTON, utilizando la Cámara Schmidt, con el prisma objetivo.

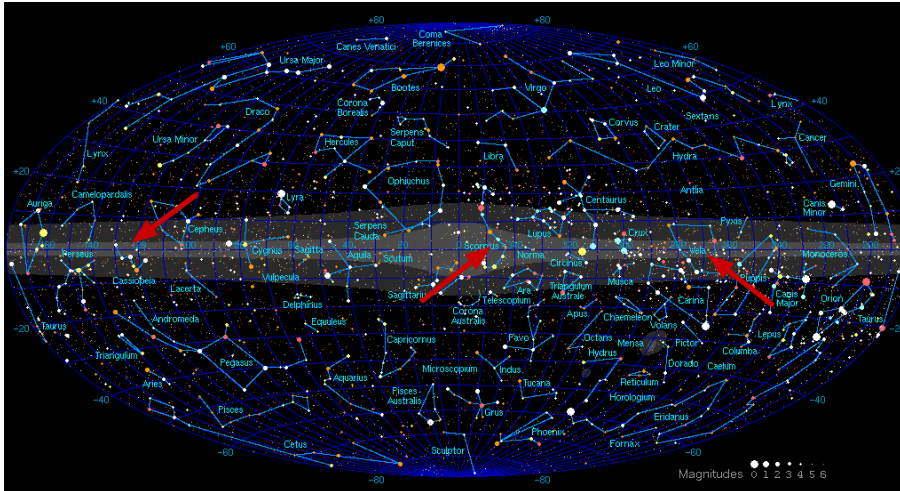


Figura 2.1: Distribución de las constelaciones en la Vía Láctea, Nótese que las regiones seleccionadas por el artículo de Márquez-Limón et al. (1992) [23] (marcadas con flechas rojas) están ubicadas en el plano del disco galáctico; zona donde se concentra la formación estelar.

2.2. Las observaciones

Para llevar a cabo las observaciones se utilizó el telescopio principal del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), ubicado en la Sierra de la Mariquita, en Cananea, Sonora, a una altitud

de 2480 m s. n. m.

Dicho instrumento es un telescopio reflector óptico tipo Ritchey-Chrétien constituido por dos espejos; uno primario de 2.12 metros de diámetro y uno secundario hiperbólico de 50 cm; con una distancia focal de 25 metros. Este telescopio se encuentra montado en una horquilla, lo que le da dos grados de libertad.

Las observaciones estaban contempladas para realizarse durante las noches del 31 de agosto y la del 1 de septiembre de 2024; sin embargo, debido a las condiciones climáticas en Cananea, Sonora, únicamente fue posible observar el 1 de septiembre. Dichas observaciones se realizaron conectándose de manera remota desde Tonantzintla, con el apoyo de técnicos, tanto de Sonora como de Puebla. Se mantuvo contacto permanente en línea entre ambas partes y se controlaron los parámetros de las imágenes capturadas desde Tonantzintla, a través de un escritorio remoto. Además de los espectros de las estrellas problema, se obtuvieron las imágenes para eliminar ruidos (bias, flat fields, etc.) e imágenes para las calibraciones (lámparas de HeAr y estrellas estándar de flujo). Para cada observación se introdujeron en la consola de mando el tiempo de exposición, número de imágenes a capturar y las coordenadas del objeto a observar. Los técnicos en el OAGH apoyaron operando el telescopio al apuntarlo a las coordenadas indicadas y centrar los objetos en la rendija y en la cámara de guiado; una vez obtenido el espectro de un objeto de la muestra, se repetía el proceso, al tiempo en el que se llevaba un registro en una bitácora, anotando la fecha, nombre del objeto, nombre del archivo, tiempo universal, tiempo de exposición, masa de aire, foco y anotaciones. Por último, se repitió este procedimiento, ahora apuntando hacia las estrellas estándar en flujo.

Adicionalmente, ya se contaba con observaciones previas de algunos de los objetos de este campo, realizadas por Raúl Mújica, entre 1996 y 1999. Este fue otro de los motivos por los que esta región fue seleccionada para realizar la presente investigación.

Previo a las noches de observación, se verificaron las coordenadas de cada objeto de estudio proporcionadas en el artículo de Márquez-Limón et al. (1992) [23] para confirmar si coincidían con las marcadas en la placa, ya que durante las observaciones de Raúl Mújica se habían notado algunas inconsistencias. Afortunadamente, únicamente hubo dificultad con una coordenada, debido a que no coincidía con el campo mostrado, de ahí que se procedió a hacer la corrección de estas coordenadas. A pesar de esto, cabe resaltar que ambos objetos fueron observados; tanto el que se localizaba en las coordenadas erróneas como el que encontramos en las corregidas.

En este trabajo fueron utilizados dos espectrógrafos: el LFOSC y el Boller & Chivens, instrumentos con distintas características, no cruciales para los objetivos, las cuales se explican a continuación.

LFOSC

Como ya se mencionó, para las observaciones de los años 1996-1999, realizadas por R. Mújica, fue utilizado el *Landessternwarte Faint Object Spectrograph and Camera* (LFOSC), el cual es un reductor focal. Dicho instrumento se coloca en el foco del telescopio Cassegrain y permite, además, obtener imágenes directas con su detector.

Este detector es un CCD (dispositivo de carga acoplada, por sus siglas en inglés) *EEV P8603* de 385x578 píxeles, con una resolución de $22\mu\text{m}$ por píxel. Este CCD, con un campo de $10' \times 6'$ tiene una escala de imagen de $1''/\text{píxel}$.

Adicionalmente, se cuenta con una rendija en la que el espectro estará orientado de Oeste a Este. Esta rendija sirve para aislar la luz del objeto a estudiar y no obtener los espectros de estrellas cercanas o demás objetos que puedan interferir en el resultado.

También se utilizó un grisma (combinación de rejilla de dispersión con prisma) con una dispersión de $8.2 \text{ \AA}/\text{píxel}$, el cual cubre un intervalo de $4200\text{-}9000 \text{ \AA}$.¹

¹Según datos proporcionados por la página oficial del INAOE [18]

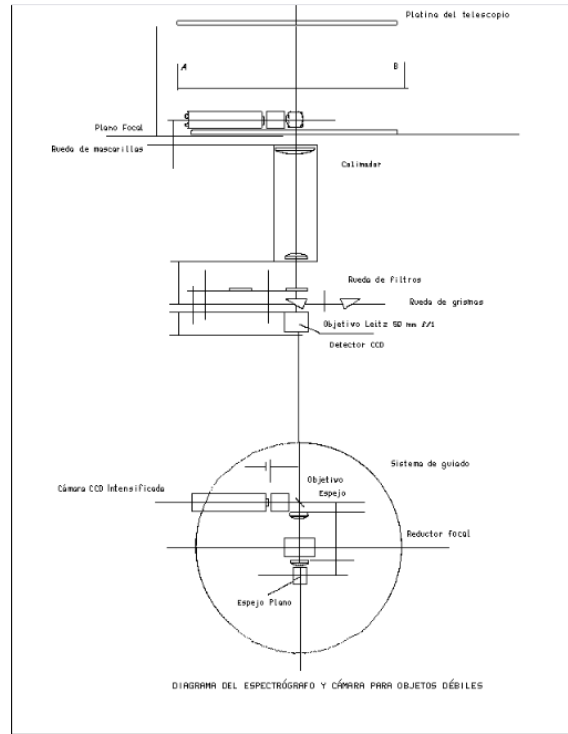


Figura 2.2: Diagrama del espectrógrafo LFOSC

Boller & Chivens

El espectrógrafo Boller & Chivens es un instrumento para obtener espectros con ayuda de una rejilla de difracción mediante la cual la luz es dispersada. Se coloca sobre un foco f/12 Cassegrain del telescopio y contiene un colimador de longitud focal de 1080 mm que convierte un haz de luz divergente en uno paralelo hacia una cámara de longitud focal de 465 mm. Este espectrógrafo cuenta con una escala de placa de $8.185''/\text{mm}$, lo cual equivale aproximadamente a $0.463''/\text{pixel}$. El ancho de la rendija puede ser cambiado manualmente hasta 1000 micras con intervalos de 1 micra. La longitud máxima de la rendija es de 3 minutos de arco y está orientada por omisión de Este a Oeste. Este espectrógrafo cuenta con una rejilla de dispersión, con ángulo ajustable en intervalos de 5 minutos de arco. Para la calibración en longitud de onda, cuenta con una lámpara de Helio-Argón. Como detector, se tiene un CCD TK1024 AB de la marca Tektronix de 1024×1024 píxeles, cada uno de $24 \times 24 \mu\text{m}$. Este detector opera a -110°C .

La rejilla utilizada en este trabajo es la de 150 líneas/mm, lo que proporciona una resolución de 3.2 \AA y está inclinada a 3.55 grados. El ángulo de dispersión está dado por:

$$\theta = \sin^{-1}(5,62 \times 10^8 m \lambda r)$$

Donde m es el orden de dispersión, r las líneas/mm de la rejilla y λ el ancho de onda en Å .

La dispersión está dada como

$$D = \frac{\lambda}{2F \tan \theta}$$

Donde F es la longitud focal del espectrógrafo, que para este caso es igual a 465 mm. Con esto, se conocen entonces las especificaciones de la instrumentación.²

²Especificaciones obtenidas desde la página web oficial del INAOE [19]

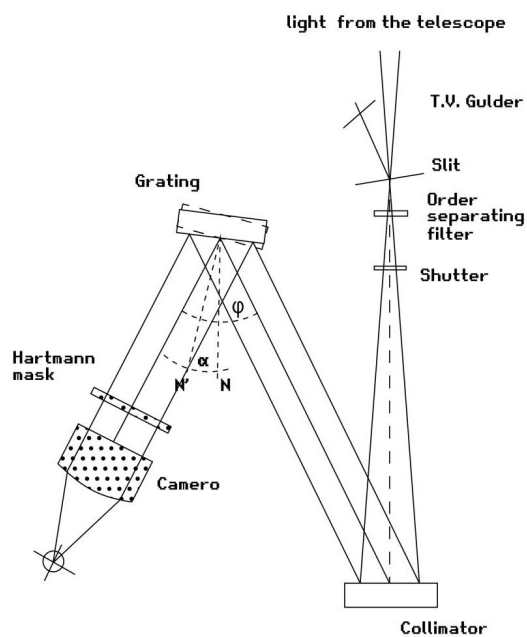


Figura 2.3: Diagrama del espectrógrafo Boller & Chievens

Objetos observados

En la Tabla 2.1 se presentan los objetos observados para este trabajo; las columnas contienen la siguiente información: el nombre asignado (de manera arbitraria en este trabajo), ascensión recta (α), declinación (δ), tiempo de exposición en segundos (Exp. Time), número de imágenes tomadas (#), espectrógrafo utilizado (Instrumento) y fecha en la que fue observado.

Cabe aclarar que estos objetos llevan por nombre la raíz de la constelación (CAS, por Casiopea) seguida del número asignado en el artículo de Márquez-Limón et al. (1992) [23]. Adicionalmente, se agrega una letra en el nombre en caso de que hayan sido observados distintos objetos bajo una misma coordenada, debido a alguna inconsistencia, lo cual será explicado a detalle más adelante.

Selección de la muestra y observaciones
2.2 Las observaciones

Nombre	α	δ	Exp. Time	#	Instrumento	Fecha
CAS01	00 36 47	+59 41 26	600	2	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS02	00 41 08.5	+60 51 52	420	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS03	00 43 15	+59 52 19	420	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS04	00 43 50.38	+60 13 07	60	1	LFOSC	16 Jul 1996
CAS05	00 50 38.4	+60 13 07.2	120	1	LFOSC	22 Sep 1999
CAS06	00 52 44.3	+56 37 04.3	180	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS07a*	00 53 25	+60 30 47	420	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS07b*	00 56 25	+60 47 38	600	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS08	00 57 35	+61 28 08	120	1	LFOSC	22 Sep 1999
CAS09a*	01 07 14.1	+58 30 54.7	600	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS09b*	01 07 14.5	+58 31 2.55	600	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS09c*	01 11 12	+61 06 06	420	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024
CAS10	01 11 55	+59 18 05	120	1	LFOSC	22 Sep 99
CAS11	01 12 11	+59 57 25	180	1	LFOSC	22 Sep 1999
CAS12	01 14 56	+59 42 13	600	1	LFOSC	16 Jul 1996
CAS13	01 15 59	+59 09 14	420	3	<i>B&CH</i>	01 Sep 2024

Tabla 2.1: Observaciones realizadas. Los objetos marcados con asterisco presentaban inconsistencias en su identificación o en sus coordenadas.

Capítulo 3

Procesado de datos

Para poder realizar el análisis de cada objeto, es necesario procesar las imágenes que se obtienen, ya que al momento de observarlas contienen señales no deseadas. Esto se logra con la ayuda de distintas herramientas ya incluidas en paqueterías de software dedicados. En este capítulo se hablará del proceso de reducción que se siguió y cuáles fueron las herramientas utilizadas en cada paso para reducir las imágenes.

Una vez realizadas las observaciones, los archivos digitales fueron almacenados en la computadora del telescopio del OAGH, a la cual se accedió remotamente a través del software AnyDesk, ya que permite acceso a distancia entre computadoras. Los datos se descargaron para poder llevar a cabo el procesamiento, esto es, eliminar ruido y señales que no son de interés y que dificultan el análisis del espectro de cada estrella a estudiar. Estas imágenes están en el formato “.fits”, que contiene, además de la matriz de píxeles con la señal detectada, toda la información de la observación, como la fecha, el tiempo de exposición, coordenadas del objeto e incluso el nombre del observador.

3.1. Procesado estándar

Para dejar una señal limpia, se realizó un procesado utilizando el software *PyRAF*, el cual es un lenguaje de comandos para *IRAF*, basado en *Python*. *IRAF* (Image Reduction and Analysis Facility) es un software diseñado específicamente para la reducción de imágenes astronómicas en arreglos de píxeles como los obtenidos por los detectores CCD.

A continuación se presentan las correcciones que son necesarias para obtener el espectro “limpio” de los objetos observados:

Bias o ruido de lectura

Al ser componentes electrónicos, los detectores generan ruido inherente al proceso de lectura electrónica y es el mismo para todas las exposiciones. La corrección por bias permite eliminar este ruido intrínseco del detector por medio de unas imágenes tomadas con un tiempo de exposición de 0 segundos, esto es, con el obturador cerrado y, de preferencia, que no llegue luz al telescopio. Esto causa que la imagen obtenida sea únicamente el ruido propio del detector; sin embargo, no es suficiente con una sola imagen para restarla de nuestros datos obtenidos debido a que este ruido por corriente oscura no es estático, sino que cambia en cada instante. Para tener una imagen que pueda ser restada de las demás, y genere resultados convincentes, se toma un número varias imágenes, entre 5 y 10, y se combinan utilizando la mediana para obtener una imagen promedio del bias.

Una vez generada, la imagen resultante se resta de las demás para así eliminar el ruido intrínseco. En nuestro caso, para este paso, fueron combinadas 10 imágenes tipo bias.

Sección eficaz

Cabe aclarar que previamente las imágenes (tanto bias como el resto) fueron recortadas debido a que no en todos los píxeles llega información útil, además de que una sección se utiliza para la lectura y tampoco contiene información útil, por lo que se debe seleccionar la sección eficaz del detector y recortarla, para lo cual hay una tarea llamada Trimsec.

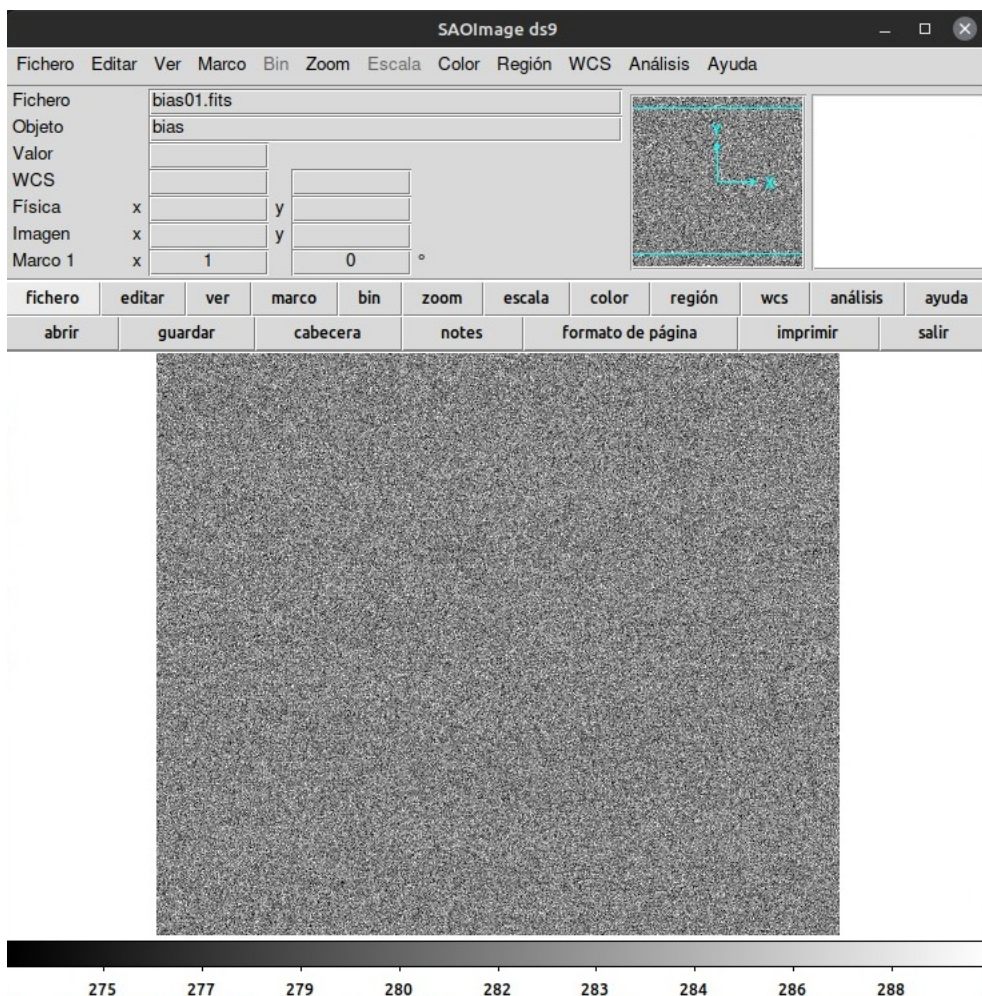


Figura 3.1: Bias

Corrección por flat field o respuesta pixel a pixel

La corrección por flat field o campo plano se debe a que la respuesta de píxel a píxel, en el CCD, es distinta. Esto quiere decir que cada uno de los píxeles responde de forma distinta a una misma señal, lo que ocasiona que se pueda presentar una variación en la iluminación del espectro.

Para corregir este problema se toman imágenes de distinto tiempo de exposición de una onda plana, la cual se genera iluminando, con una lámpara de halógeno, una pantalla dentro de la cúpula del telescopio. Estas imágenes, que se obtienen apuntando el telescopio a la pantalla, son las que conocemos como flat-fields o más comúnmente como flats. Los flats que no están saturados o subexpuestos son combinados posteriormente, utilizando la mediana, para obtener una imagen

promedio de la respuesta de cada uno de los píxeles; es entonces que se normaliza dicha respuesta y se conoce el rendimiento en cada píxel de la imagen.

Como se ha mencionado, una vez seleccionadas las imágenes flats, se procede a combinarlas, promediarlas y normalizarlas para generar la imagen que finalmente servirá para la corrección. Cada una de las imágenes problema será dividida entre este flat final, para así obtener un espectro corregido por la respuesta píxel a píxel, evitando una variación significativa en la señal.

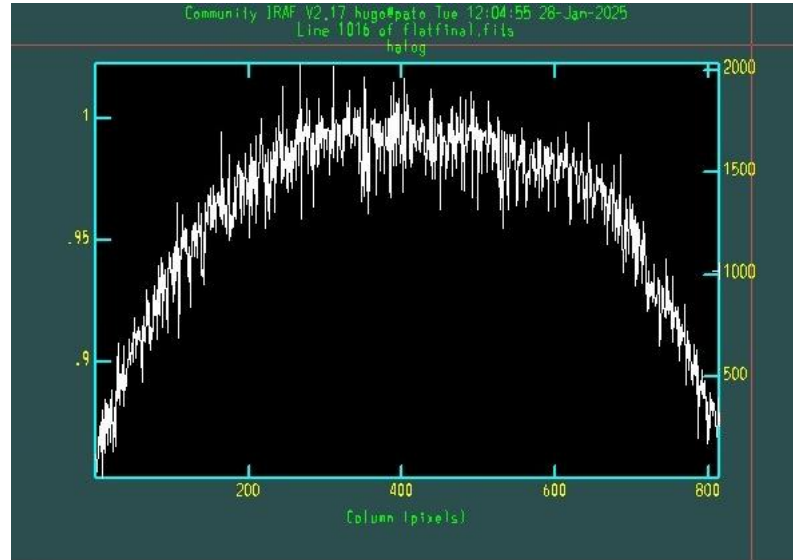


Figura 3.2: Flats

Rayos cósmicos

Debido al constante bombardeo de rayos cósmicos hacia la Tierra, una imagen se puede ver afectada si uno o varios de estos inciden en el detector durante la captura de las imágenes. Es difícil eliminar los rayos sin afectar una imagen en singular. Sin embargo, la forma de eliminar estos desperfectos se vuelve sencilla cuando se toma más de un espectro del mismo objeto y se combinan las imágenes.

Para lograr eliminar los rayos cósmicos, se obtuvieron al menos tres imágenes de cada uno de los objetos, con el mismo tiempo de exposición para que, al ser combinadas, usando la mediana, utilizando la tarea *imcombine*, los rayos cósmicos sean eliminados sin afectar los espectros de los objetos.

3.2. Extracción y calibración

Una vez eliminado el ruido del detector y los rayos cósmicos, es necesario extraer el espectro del objeto observado, volverlo unidimensional, para conocer la emisión e intensidad en cada una de las longitudes de onda del intervalo en el visible. Previamente, es necesaria la calibración en longitud de onda, ya que no conocemos en qué intervalo específico del espectro electromagnético estamos trabajando.

Una vez extraído y calibrado nuestro espectro en longitud de onda, debemos eliminar la luz de fondo, es decir, la contribución del cielo, para posteriormente calibrar en flujo y eliminar la curva de respuesta del detector y finalmente podemos analizar los resultados, ya que estarán representados correctamente.

Calibración en longitud de onda

Para conocer en qué intervalo del espectro electromagnético estamos observando con nuestra configuración, es necesario hacer una calibración en longitud de onda con una señal de referencia, esto es, con longitudes de onda conocidas. Para esto se hace pasar por el espectrógrafo un haz de luz proveniente de unas lámparas de helio-argón, que están dentro del mismo espectrógrafo, ya sea el Boller & Chivens o el LFOOSC, de las cuales ya se conocen varias de las líneas en emisión de su espectro, y se obtienen imágenes. Posteriormente, en la tarea *identify* se procede a identificar cada una de estas líneas de emisión manualmente, se les da el valor de longitud de onda que les corresponde, de acuerdo con un "mapa" de líneas y la tarea hace un ajuste hasta encontrar el mejor. Posteriormente, se extrapola a dos dimensiones, con lo cual se tiene ahora un mapa de transformación bidimensional.

Con los valores de este ajuste bidimensional, se hace la transformación de valor en píxeles a angstroms, es decir, podemos ya calibrar los espectros de las estrellas, ahora conociendo la longitud de onda en cada una de las líneas de emisión o absorción.

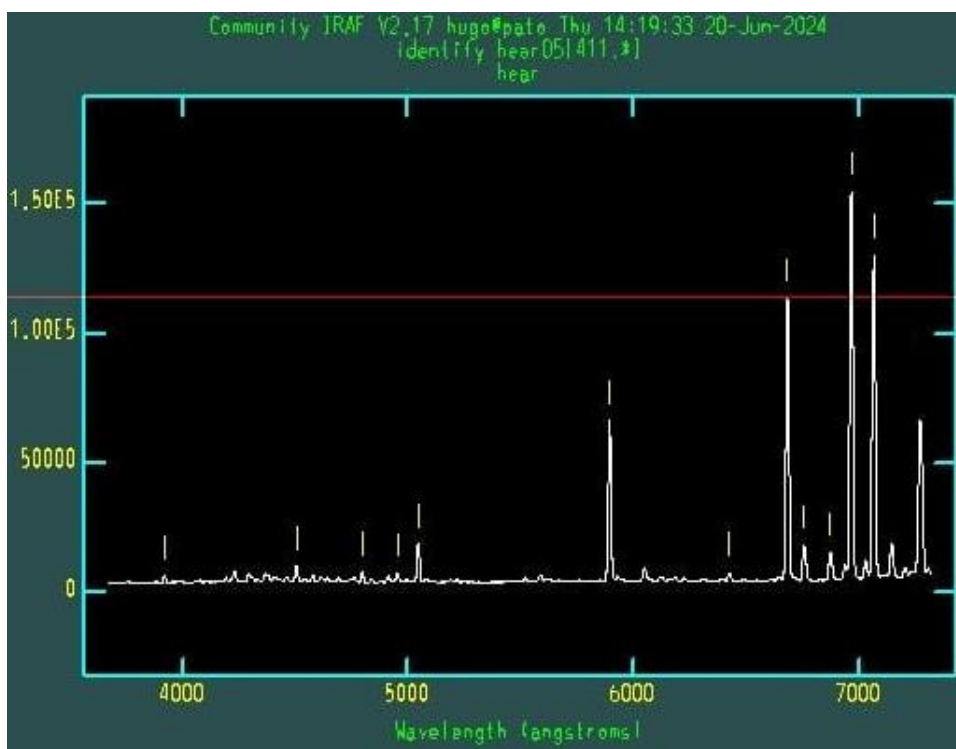


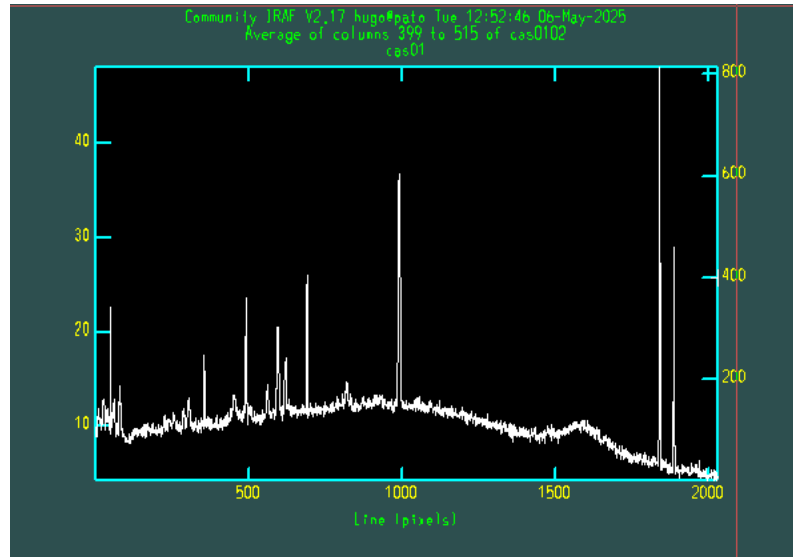
Figura 3.3: Identificación de las líneas del espectro para las lámparas de HeAr

Sustracción del cielo

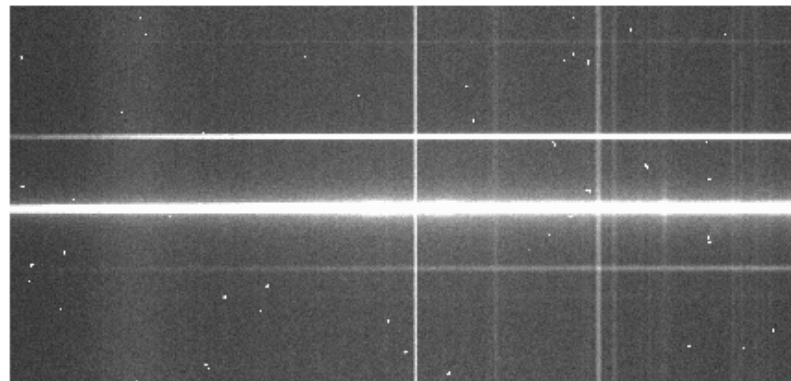
Debido tanto a la naturaleza de la atmósfera terrestre como a diversos factores, como lo son la contaminación lumínica, dispersión atmosférica, etc., el cielo tiene un brillo, una contribución lumínica que es necesario sustraer del espectro de cada estrella.

Para esto es necesario conocer el nivel de "brillo" del cielo en donde se encuentra nuestro observatorio y restarlo de nuestros espectros obtenidos en las observaciones. Esto es posible gracias a la rendija colocada en el espectrógrafo, en donde se centra el objeto de interés, ya que en la misma imagen también se detecta la contribución del cielo, por lo que es posible medir su valor a

ambos lados del espectro de la estrella problema y extrapolarlo sobre el mismo para sustraerlo y eliminarlo. Al final, se tiene la imagen únicamente con el espectro a estudiar.



(a) Espectro de la contribución del cielo, se ven las líneas en emisión, pero también ha algunos rayos cósmicos.



(b) Imagen obtenida del CCD, el haz horizontal brillante del centro es el espectro de la estrella, las líneas más tenues horizontales son otros objetos cercanos a la estrella y las líneas verticales son parte de la contribución del cielo.

Figura 3.4: Contribución del cielo a eliminar en este paso, incluso se ven claramente líneas en emisión que afectan el espectro de los objetos celestes a observar.

Calibración en flujo

Es necesario también conocer la cantidad de energía que estamos realmente recibiendo, independientemente de la respuesta del instrumento, la extinción atmosférica y la respuesta del detector, por lo que es necesario observar cada noche una fuente con flujo ya conocido. Es por esto que se toman espectros de estrellas estándares, de las cuales se conoce su flujo a través de mediciones absolutas.

La información de algunas de estas estrellas estándar ya está pre-cargada en la base de datos del software de reducción y solamente es necesario indicar cuál fue la estrella utilizada.

Por otro lado, para corregir por el efecto de la atmósfera, es necesario transformar la señal recibida en el detector a la manera en que se vería el espectro de la estrella si fuera observado desde fuera de la Tierra. Para esto es necesario conocer la curva de extinción atmosférica, la cual es dependiente de la ubicación en donde se haya realizado la observación. Para el caso del OAGH, no se tiene una curva de extinción determinada; sin embargo, el *Kitt Peak National Observatory*, ubicado en Arizona, a sólo 150 km hacia el noroeste de Cananea, cuenta con una y puede ser utilizada, ya que las condiciones atmosféricas son muy similares.

Conocidos estos datos, se compara el flujo observado en la estrella estándar y el flujo conocido de la misma, para obtener la función de transformación que será aplicada a cada una de las estrellas estudiadas.

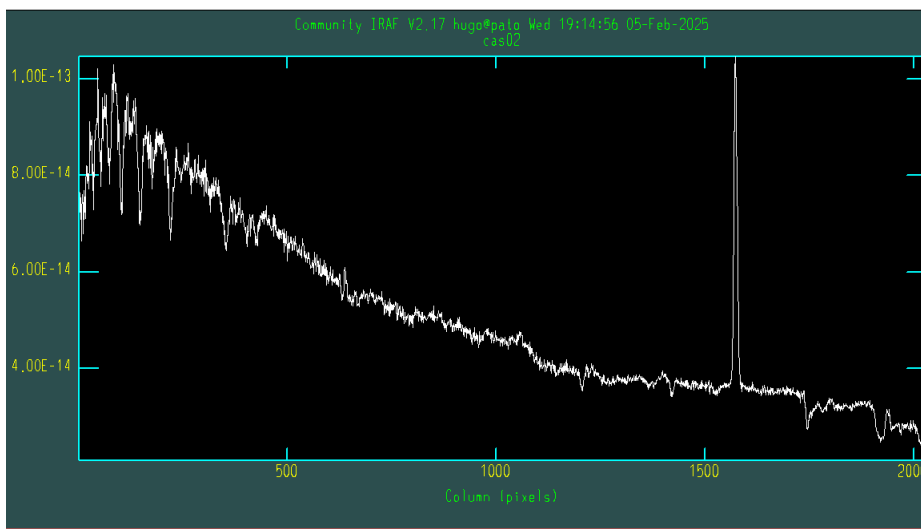


Figura 3.5: Espectro calibrado en flujo.

A manera de resumen del proceso, en el diagrama de la figura 3.6 se muestran los pasos seguidos, la tarea dentro de *Pyraf* para ejecutarlos, y las imágenes a las cuales se aplica cada uno de los pasos, dando como resultado un espectro reducido en el que se hace el análisis espectroscópico.

Con esto se concluye la reducción de cada uno de los espectros, lo que permite continuar con el análisis y la discusión de los resultados obtenidos en la observación.

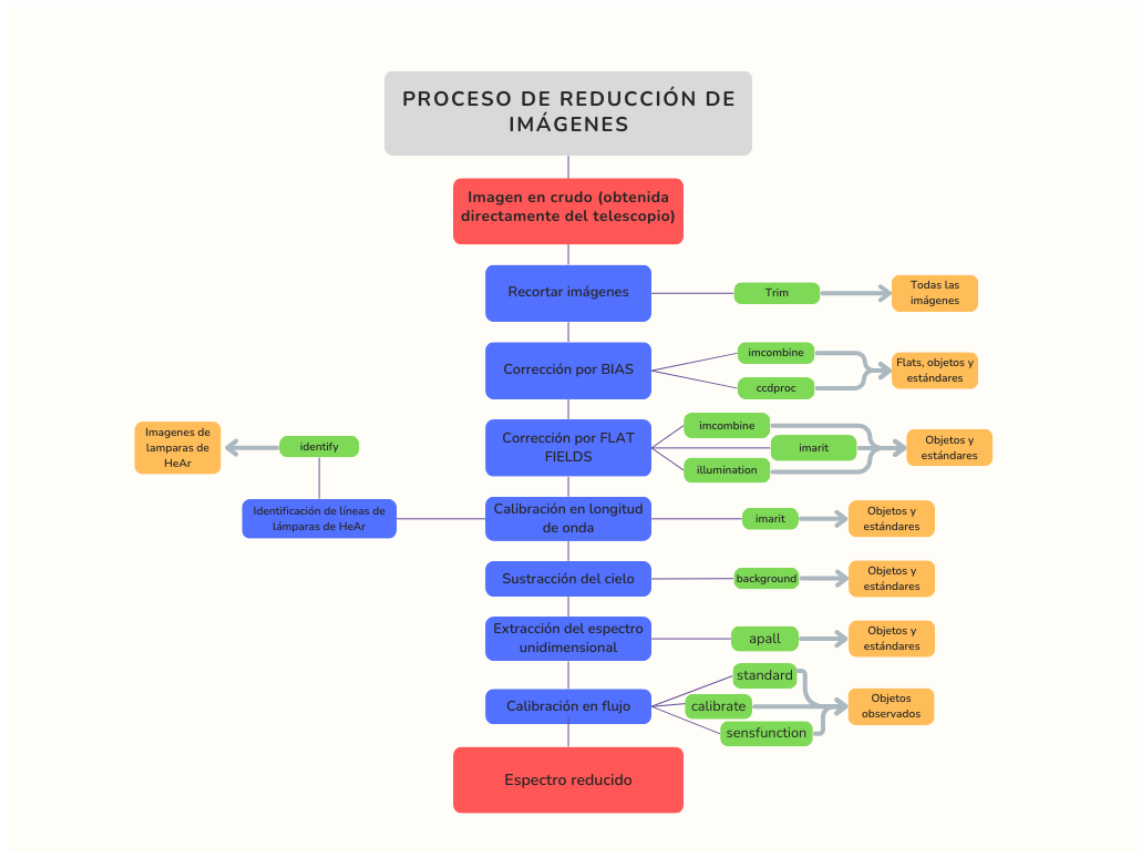


Figura 3.6: Pasos para la reducción de espectros

Capítulo 4

Discusión y resultados

Una vez obtenidos los espectros finales, se procedió a analizar los resultados. Durante una investigación espectroscópica, es de esperar que distintos objetos presenten distintas características, las cuales son indicadoras de distintos procesos que ocurren en cada una de las estrellas. En este capítulo se discuten cuáles de esas características están presentes basándose en la evidencia espectroscópica.

Como se mencionó en los objetivos de este trabajo, la finalidad principal de este trabajo es confirmar si cada uno de estos objetos presenta emisión en $H\alpha$, así como, de ser posible, asignarles un estimado de su tipo espectral, comparando con atlas espectrales existentes, que contienen estrellas estándares espectroscópicas.

Es muy importante la correcta identificación de otras líneas de emisión presentes en los espectros, lo cual se utiliza para determinar con precisión si el objeto es joven o no, sin embargo, para llevar a cabo esto, son necesarias observaciones con mejor resolución, lo que implica mayor tiempo de observación, por lo cual, aun cuando hemos intentado la identificación de líneas, no es uno de los objetivos principales, ni afecta los resultados.

Adicionalmente, se hizo una revisión bibliográfica, buscando estudios previos de las estrellas estudiadas, y encontramos algunos estudios previos para la mayoría de las estrellas de este trabajo, aunque en sólo unos pocos se utilizó espectroscopía como la de este trabajo; sin embargo, se mencionan aspectos que ayudaron en esta investigación.

4.1. Corrección en algunas identificaciones

Es importante destacar que para un par de los objetos hubo algunas complicaciones, ya que no estaban bien identificados, las coordenadas proporcionadas eran incorrectas o el objeto marcado, en las cartas de identificación del artículo de Márquez-Limón et al. (1992) [23], no era el indicado.

Una ventaja que se tuvo en el desarrollo de este trabajo es que se tuvo acceso a las placas astronómicas originales (A.1); se pudieron inspeccionar las placas involucradas de forma física y nos proporcionaron una placa en versión digital. Esto permitió que los objetos marcados inicialmente fueran identificados de forma correcta en la placa original en la que se encuentran y, por lo tanto, obtener sus coordenadas correctas.

Después de revisar coordenadas, marcas, etc., para cada una de las estrellas estudiadas, se encontraron errores en dos de ellas; los detalles se presentan en la Tabla 4.1.

Debido a estos errores y a que se desconocía cuál era el objeto correcto al que se le asignó la clasificación en el artículo de Márquez-Limón et al. (1992) [23], se optó por observar todos los objetos a los que se pudo haber identificado según la coordenada original (en el caso en el que las

coordenadas marquen un lugar entre dos objetos) o, en otro caso, se observó el objeto marcado en la placa astronómica original.

Como distintos objetos correspondían a un mismo nombre debido a la confusión en las coordenadas o la identificación según sea el caso, se les anexó una letra adicional (como es presentada en la Tabla 2.1) para distinguir cada uno.

Nombre	Error en la identificación
Cas07	Coordenadas no coinciden con el objeto marcado en la placa.
Cas09	Coordenadas marcan entre dos objetos distintos. Las coordenadas no coinciden con el campo mostrado

Tabla 4.1: Errores en la identificación de los objetos 7 y 9 de Casiopea

Para la asignación del tipo espectral de cada estrella, se utilizó como apoyo el Atlas de Clasificación Espectral¹. Los espectros obtenidos se compararon con cada una de las estrellas en el Atlas, revisando la forma general del espectro continuo, así como las líneas de emisión y absorción de cada tipo espectral. En el apéndice B se muestra un ejemplo de los tipos espectrales según la clasificación de Harvard. Adicionalmente, se dio una revisión a cada línea de emisión y absorción del espectro, para lograr asignar el tipo espectral de forma más precisa, junto con las referencias encontradas en la literatura.

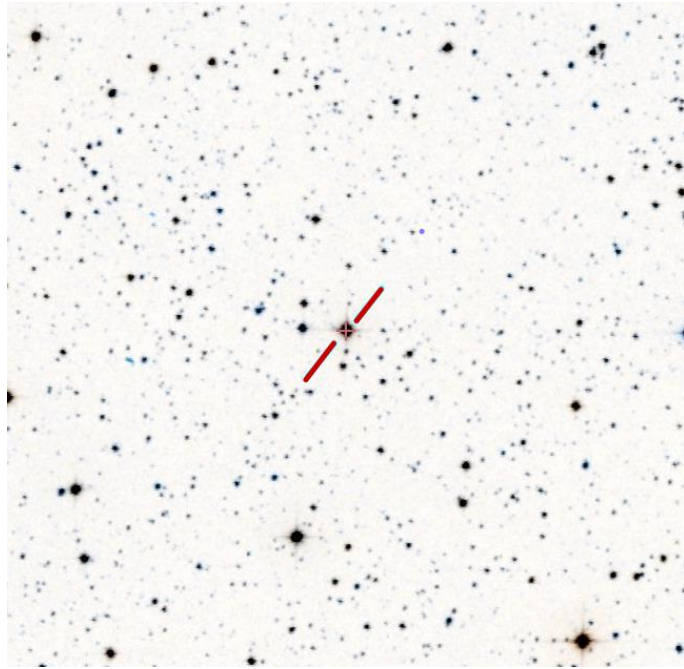
Una vez comparados los espectros, se procedió a dar la discusión para cada uno de ellos, tomando en cuenta líneas de absorción, emisión, tipo espectral y la emisión de $H\alpha$, en caso de que exista. También se tomaron en cuenta las referencias existentes en la base de datos *SIMBAD*.

4.2. Resultados

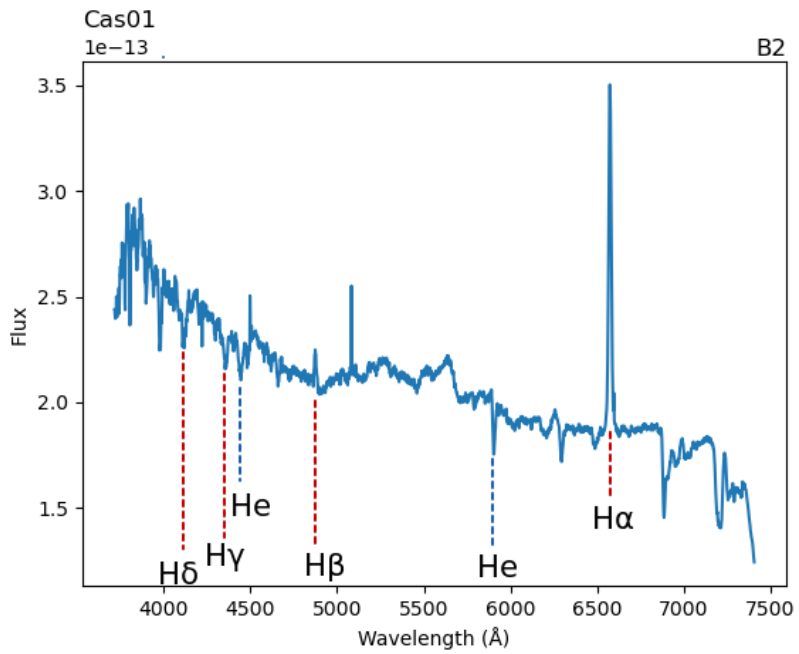
4.2.1. Objetos individuales

En el primer objeto, **Cas01**, la línea de $H\alpha$ se encuentra claramente en emisión. El pico alcanza un nivel de intensidad de $3,5 \times 10^{-13} \text{ erg/cm}^2/\text{s}/\text{\AA}$, lo cual concuerda con la clasificación "fuerte" *S* reportada en el artículo de Márquez-Limón et al. (1992)[23] para la intensidad de $H\alpha$. Para su clasificación, se tomó en cuenta la forma de su distribución espectral, así como las líneas de emisión o absorción más prominentes. Se revisó en la literatura si había estudios espectroscópicos que respaldaran la clasificación determinada en este trabajo; sin embargo, solamente se encontró que este objeto está incluido en el catálogo de estrellas OB de Reed, B.C. (2003) [29]; y no es evidente que se haya obtenido un espectro de este objeto, por lo que este trabajo es el primero en publicarlo. La serie de Balmer es visible hasta $H\epsilon$ (3970 Å), así como algunas líneas del helio, y el flujo es más intenso en el intervalo del azul, por lo que se propone que la estrella es de tipo espectral temprano (tipo B).

¹Tomado del atlas de espectros de Perry Berlind [3]



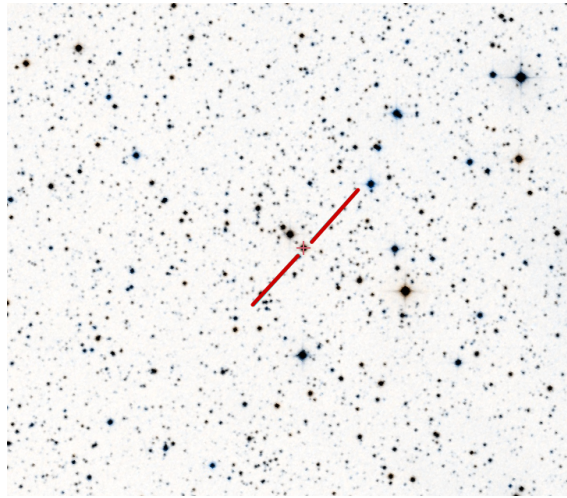
(a) Campo del objeto Cas01



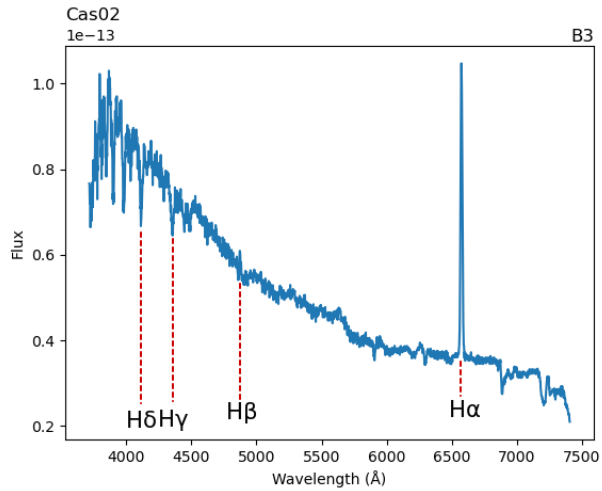
(b) Espectro del objeto Cas01

Figura 4.1: Objeto Cas01 clasificado como tipo espectral B2, el cual muestra $H\alpha$ en emisión

Para el siguiente objeto, **Cas02**, la línea de emisión en $H\alpha$ tiene su máximo alrededor de los $1 \times 10^{-13} \text{ erg/cm}^2/\text{s}/\text{\AA}$, mostrando una fuerte emisión, lo que concuerda con la clasificación obtenida de placas, la cual era S . La serie de Balmer es muy evidente y bien definida. Presenta la línea de MgII a 4481 \AA y algunas líneas de helio. Se tenía asignada una clasificación espectral estimada por Hardop (1959) [13], del tipo O o B en emisión; sin embargo, no se encontraron artículos en los cuales se respalde dicha afirmación, por lo que la clasificación asignada es la de tipo B3, basándose en las líneas de emisión, así como en la distribución espectral que es claramente más intensa en el azul.



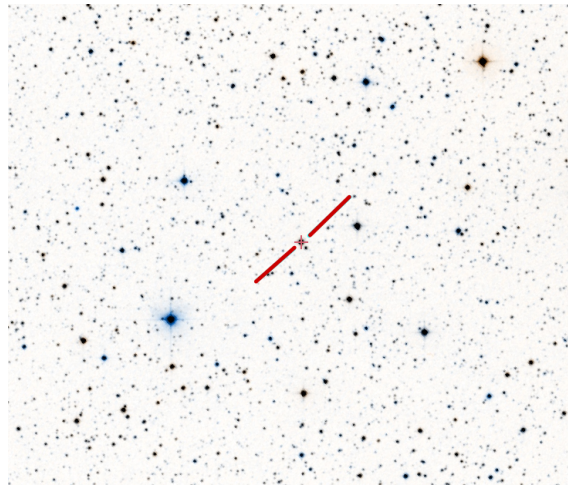
(a) Campo del objeto Cas02



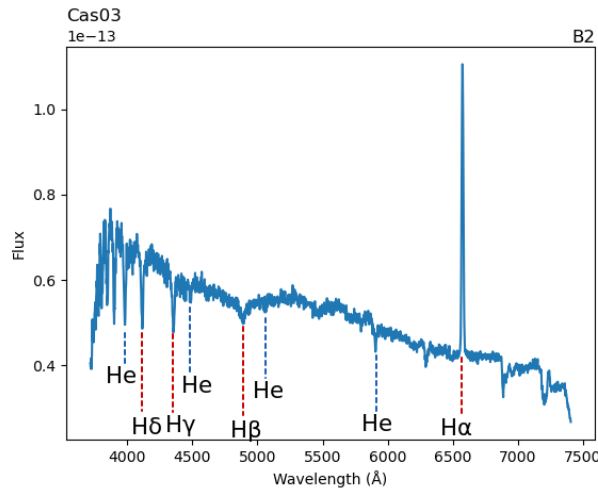
(b) Espectro del objeto Cas02

Figura 4.2: Espectro del objeto Cas02, con posible tipo espectral B3, línea intensa de $H\alpha$ en emisión.

En el objeto **Cas03**, marcado como *S* por Márquez-Limón et al. (1992) [23], la emisión es intensa, llegando más allá de los 1×10^{-13} erg/cm²/s/Å, se notan también posibles líneas en absorción alrededor de los 6300 y 6900 Å, las cuales pueden ser producidas por berilio. Se notan también líneas de absorción en los 4400, 5000 y 5800 Å, indicador de helio, típico de un tipo estelar B. Según las referencias consultadas en el ADS, se había clasificado esta estrella como una del tipo B; sin embargo, no se encontraron artículos o estudios que respalden esta clasificación, por lo que se mantendrá la clasificación asignada en este trabajo con base en las características encontradas en el espectro.



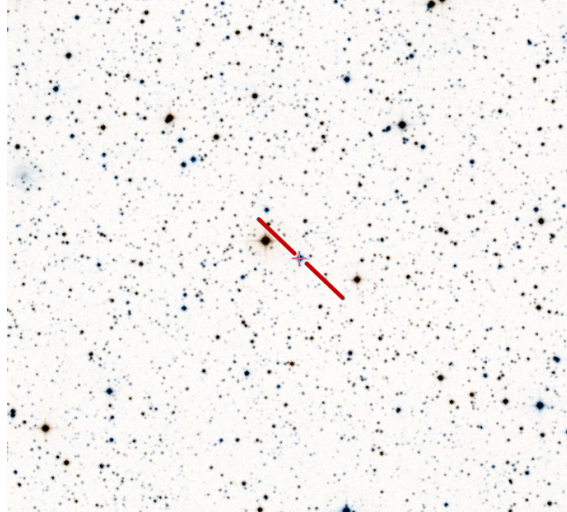
(a) Campo del objeto Cas03



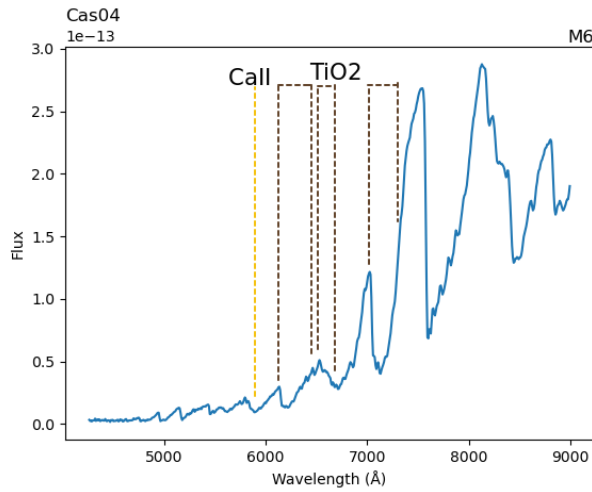
(b) Espectro del objeto Cas03

Figura 4.3: Objeto Cas03, clasificado como B2, con $H\alpha$ en emisión

El objeto **Cas04**, anteriormente marcado con probable (P) emisión en $H\alpha$ por Márquez-Limón et al. (1992)[23], no presenta dicha línea; la probable detección parece ser debida a que en la región espectral de respuesta de la placa, caen dos bandas, y donde se unen, se simula "pico" de intensidad que va desde los $\lambda = 6800\text{\AA}$, hasta los $\lambda = 7100\text{\AA}$; sin embargo, estas bandas son propias del tipo estelar y no presentan evidencia alguna de que haya algún tipo de emisión en la longitud de onda de interés de los $\lambda = 6563\text{\AA}$. En su clasificación espectral se tomaron en cuenta las bandas del óxido de titanio (TiO) alrededor de los 5900, 6100, 6500 y 7000 \AA



(a) Campo del objeto Cas04

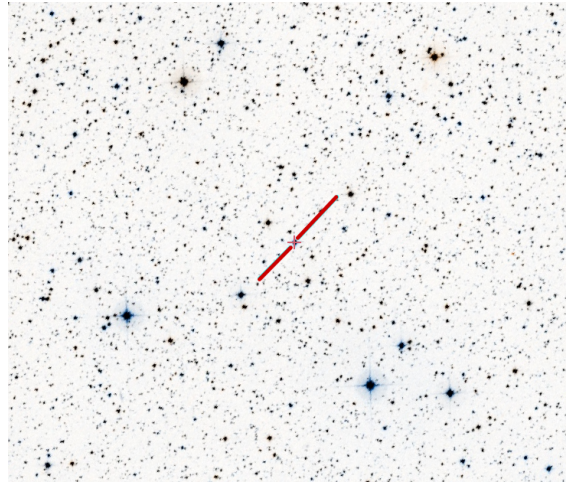


(b) Espectro del objeto Cas04

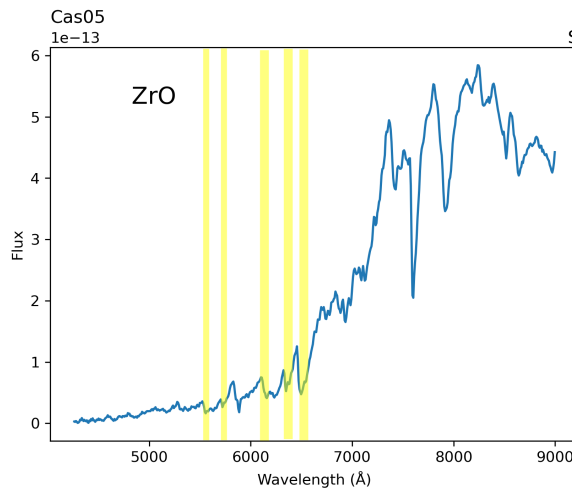
Figura 4.4: Objeto Cas04, sin emisión de $H\alpha$ y con un espectro tardío, clasificado como M6

El objeto **Cas05** fue clasificado como "fuerte" *S*, sin embargo, tampoco presenta línea de emisión evidente en la línea de $H\alpha$. El tipo espectral asignado es el de una clase *S*, aunque presenta pico aparente debido a la presencia de dos bandas adyacentes entre los 6100 y los 6700 Å. De acuerdo con Merrill (1922) [24], las estrellas tipo *S* son similares a las *M* gigantes, pero con bandas prominentes de ZrO y emiten fuertemente en el infrarrojo.

Se comparó la clasificación espectral asignada con la presente en la literatura y se encontró una investigación espectroscópica que respalda el tipo *S* de esta estrella. [26]



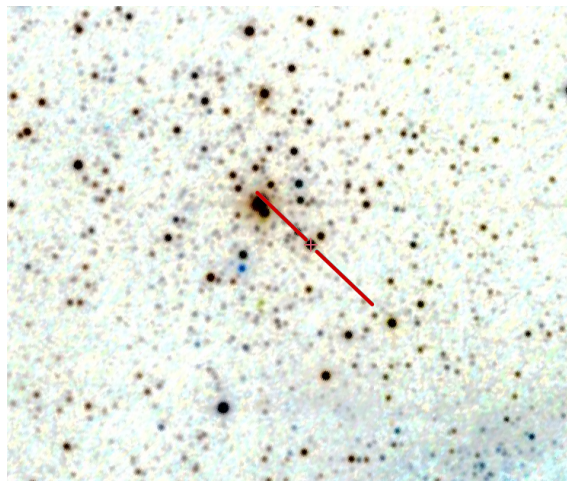
(a) Campo del objeto Cas05



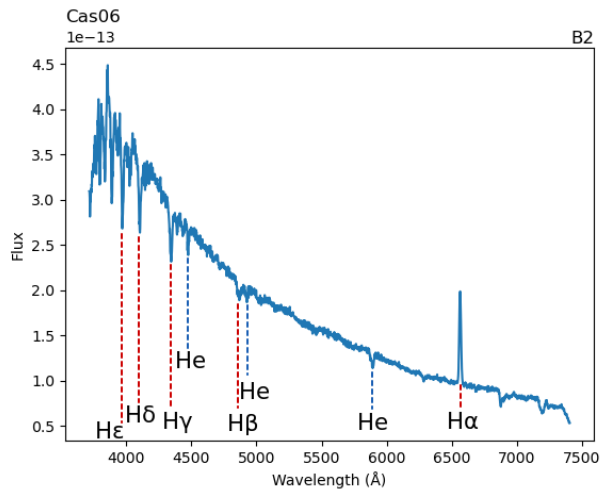
(b) Espectro del objeto Cas05

Figura 4.5: Objeto Cas05, de tipo espectral *S*. No hay $H\alpha$ en emisión.

En el objeto **Cas06**, originalmente clasificado como "débil" *W*, la serie de Balmer y las líneas de helio (4390, 4471, 4437, 4143 Å) son fuertes; $H\alpha$ es muy clara para haber sido clasificada como *W*, sin embargo, este tipo de objetos son variables, por lo que pudo haber cambiado a lo largo del tiempo. Nuestra clasificación espectral asignada es B2; sin embargo, se encontraron referencias anteriores a esta estrella, entre ellas, el trabajo de Guetter y Turner (1997) [12], en el cual se le asigna el tipo espectral B2.5Vne (estrella con tipo espectral intermedio entre B2 y B3, en emisión, en secuencia principal con líneas nebulares (n) ensanchadas debido a su rápida rotación. [6]), el cual no está tan alejado de la clasificación asignada en este trabajo.



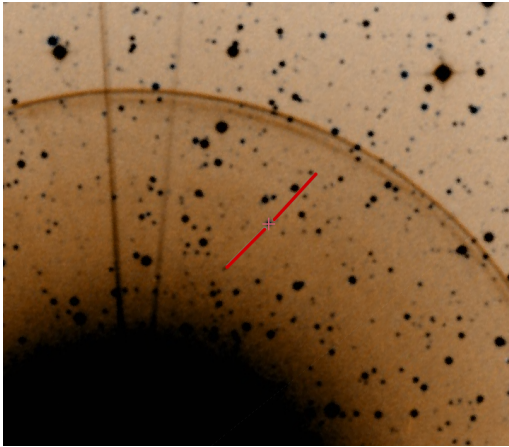
(a) Campo del objeto Cas06



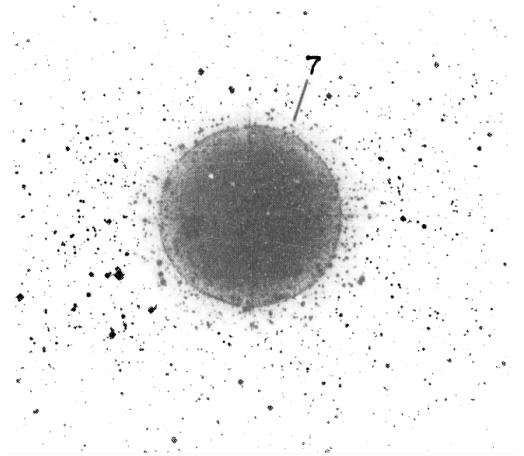
(b) Espectro del objeto Cas06

Figura 4.6: Espectro resultante del objeto Cas06, clasificado como tipo espectral B2. Hay $H\alpha$ en emisión.

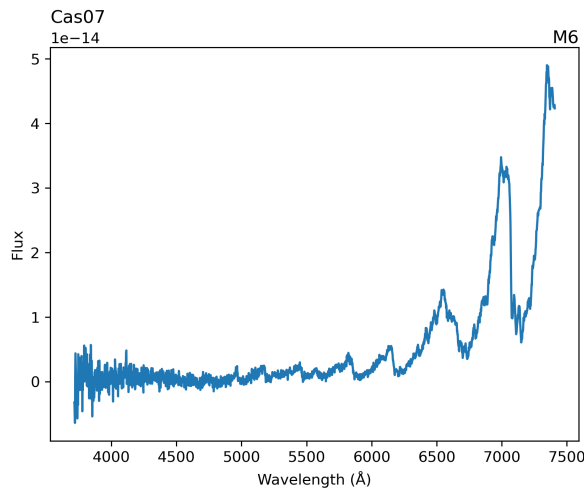
El objeto **Cas07**, marcado en un inicio como "débil" W , presentaba una inconsistencia con respecto a su identificación, ya que el campo mostrado en el artículo no era el correcto, por lo que se tuvo que revisar la placa original para corroborar que las coordenadas coincidieran con el objeto mostrado e identificado. Al introducir las coordenadas, éstas se centran en el objeto identificado en la placa original; sin embargo, este objeto no era el mismo que el artículo marcaba, por lo que se priorizó el objeto marcado originalmente en la placa. Este objeto no presenta evidencia de tener $H\alpha$ en emisión, más bien pareciera ser que, al igual que otras estrellas con espectro tardío, la aparente emisión se debe a las bandas propias del espectro. Nuestra clasificación espectral para este objeto fue la de una estrella tipo M6. Al hacer la búsqueda en la literatura, se encontró que la clasificación mostrada en el artículo de Nesci R. et al. (2018) [27] donde se trabajó espectroscopía, es la de una M6e; sin embargo, en el espectro encontrado no se halló evidencia contundente de alguna emisión en $H\alpha$; pese a ello, este objeto es marcado como una estrella variable; por lo que dicha emisión pudo no ser visible durante nuestras observaciones; no obstante, se necesitan más estudios para comprobar dicha afirmación.



(a) Campo del objeto Cas07



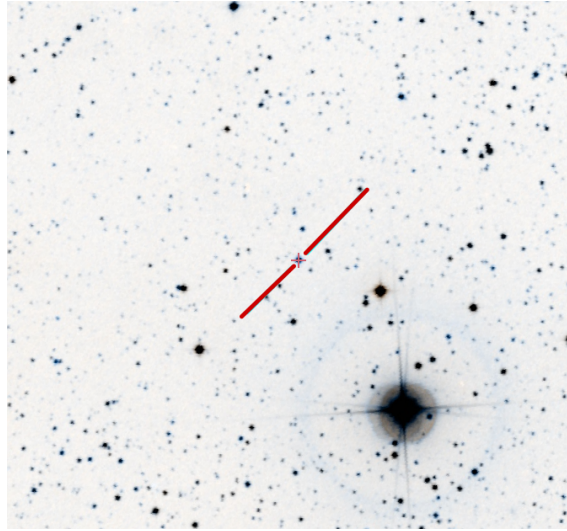
(b) Campo señalado en el artículo, con el objeto mal identificado



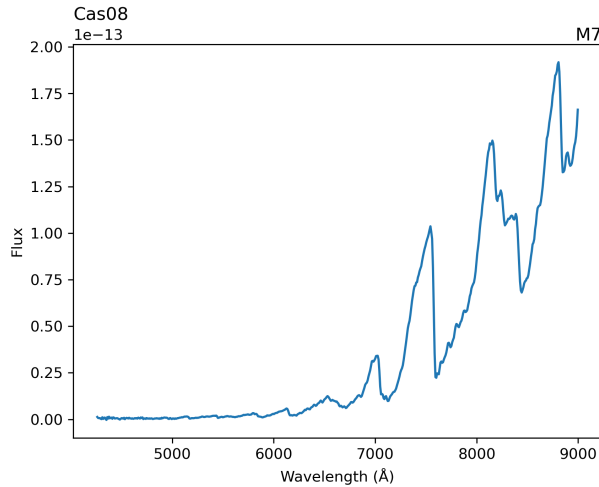
(c) Espectro del objeto Cas07

Figura 4.7: Objeto Cas07 con el campo corregido y coordenadas revisadas. No se encontró emisión en $H\alpha$. La clasificación espectral asignada es de M6.

El objeto **Cas08**, anteriormente marcado como “probable” P , emisión en $H\alpha$, también es de un tipo espectral tardío, en este caso, la clasificamos como M7. No presenta la línea $H\alpha$ en emisión; sin embargo, al igual que en los casos anteriores de estrellas tardías, hay dos bandas de TiO entre 6000 y 7000 Å que se unen, simulando un “pico”, lo cual, como ya se ha mencionado, se ha tomado como una de las posibles explicaciones de que aparezca “emisión” en las placas de Tonantzintla. Para comparar nuestra clasificación espectral, se recurrió a la literatura y no se encontró a esta estrella dentro del catálogo que menciona a las demás estrellas tipo M [16] de este trabajo.



(a) Campo del objeto Cas08



(b) Espectro del objeto Cas08

Figura 4.8: Objeto Cas08, sin emisión de $H\alpha$ y clasificado como M7

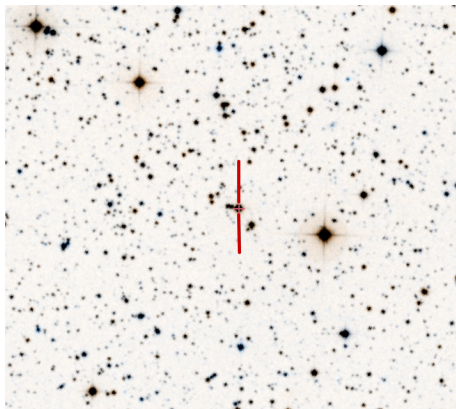
El objeto **Cas09**, marcado como "fuerte" S , es otro de los objetos que presentaban un error de identificación en el artículo. Las coordenadas presentadas no señalaban a una estrella en particular, sino que caían entre dos objetos.

Al comparar el campo presentado en el artículo con el campo que arrojaban dichas coordenadas, estos no coincidían, por lo que fue necesario comparar ambos campos con el del objeto marcado originalmente en la placa. Una vez halladas las coordenadas correctas, se procedió a observar el

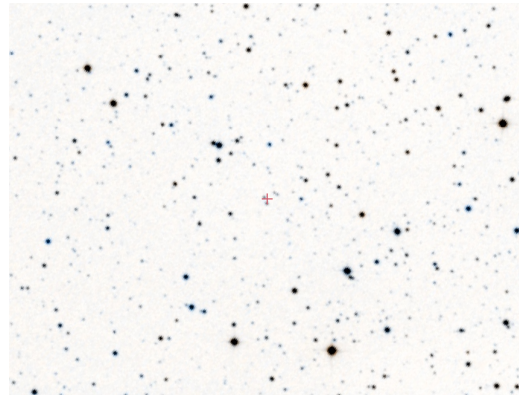
objeto correspondiente.

Esta estrella tiene referencias de observaciones previas, tres referencias de catálogos (Schwammann, 1935 [30]; Cruzalébes, 2019 [8]; Kohoutec, 1999 [21]) o surveys (Coyne, 1983 [7]); así como una investigación previa realizada por González y González (1954) [11] en Tonantzintla acerca de estrellas con emisión utilizando placas astronómicas, similar al trabajo realizado por Márquez-Limón et al. (1992) [23]; y un catálogo presentando estrellas β Cephei realizado por Labadie-Bartz et al. (2020) [22].

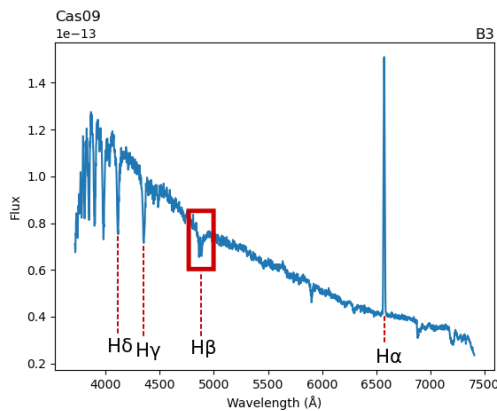
Al investigar en cada una de estas referencias acerca de este objeto, no se encontró ninguna publicación que contenga su análisis espectroscópico. Por lo que este trabajo es el primero que hace esta discusión. Sin embargo, en el artículo sobre las β Cephei se le asigna una clasificación espectral; pero no se menciona cómo es que esta clasificación fue dada. Una particularidad que no se puede dejar pasar es con respecto a la línea de $H\beta$, debido a que presenta un pico de emisión dentro de la línea de absorción. Según Slettebak (1988) [32] y Struve (1930) [33], la rápida rotación de estrellas tipo B forma envoltentes lenticulares los cuales expulsan material al ecuador, formando un anillo nebuloso alrededor de la estrella y aumentan las líneas de emisión, las cuales son de una forma u otra dependiendo de la inclinación de la estrella desde la cual es observada (Ver apéndice C).



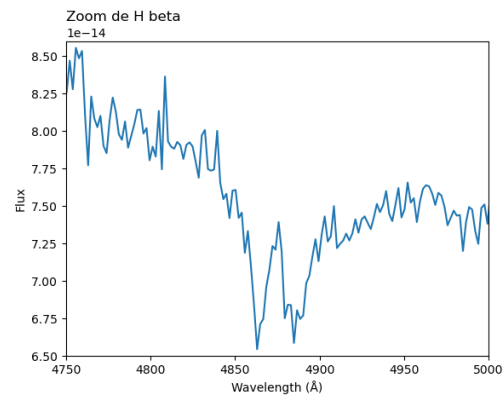
(a) Campo del objeto Cas09, revisado con la placa original



(b) Campo de las coordenadas marcadas en el artículo, las cuales fueron corregidas.



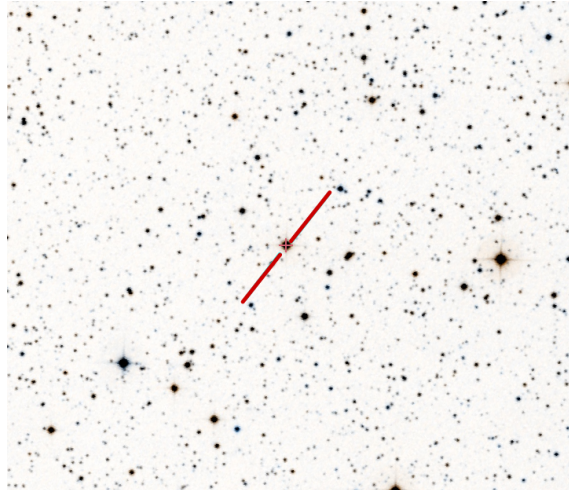
(c) Espectro del objeto Cas09.



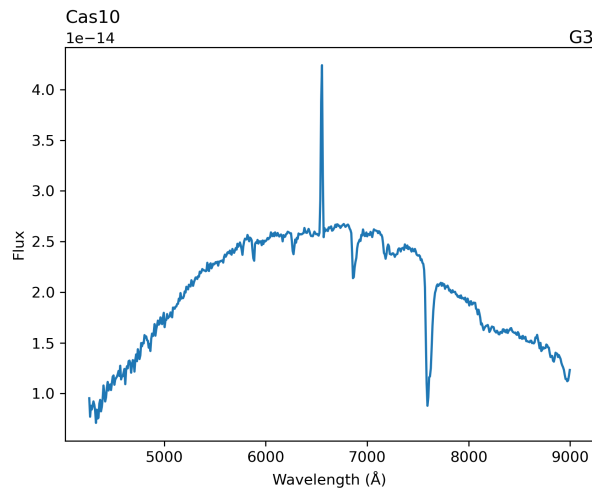
(d) Detalle de la línea de $H\beta$ marcada con un recuadro rojo en la figura 4.9c

Figura 4.9: Objeto Cas09, con emisión de $H\alpha$ y clasificado como B3. Presenta un perfil doble en la línea de $H\beta$; posible indicador de un disco y/o envoltente.

Se asignó un tipo espectral G3 para el objeto **Cas10**, originalmente marcado como "fuerte" S ; sin embargo, debido a que es una estrella de tipo tardío y presenta emisión en $H\alpha$, existe la posibilidad de que sea una T Tauri. Esto debido a las evidencias presentes; sin embargo, hacen falta más estudios como el de la emisión en el infrarrojo y/o observaciones polarimétricas para confirmar. Se revisaron las referencias para comparar el tipo espectral, pero solo se encontró un artículo de 1935, al cual no se pudo acceder. Por lo que se mantendrá el tipo espectral asignado en este trabajo.



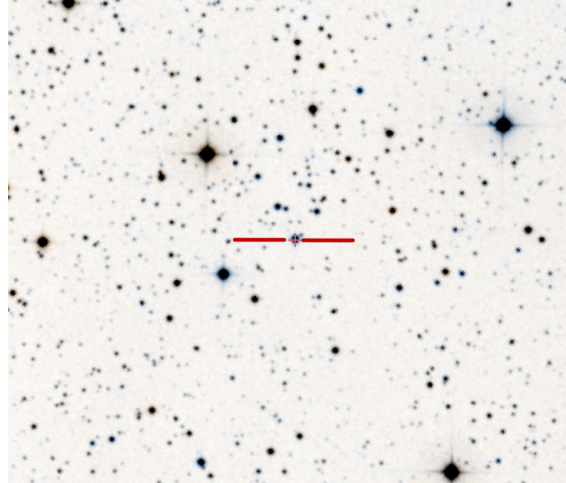
(a) Campo del objeto Cas10



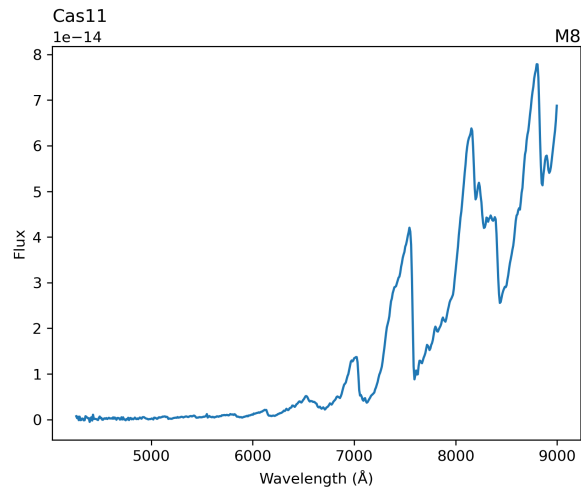
(b) Espectro del objeto Cas10

Figura 4.10: Objeto Cas10, muestra evidencias de ser una estrella T Tauri. Tiene $H\alpha$ en emisión.

El objeto **Cas11** marcado como "probable" *P*, en el artículo de Márquez-Limón (1992)[23], no presenta emisión en $H\alpha$. Se le asignó el tipo espectral M8 debido a la presencia de bandas de TiO y la distribución de energía con un claro aumento hacia el rojo. La confusión sobre la presencia de $H\alpha$ en emisión, seguramente es como en otros de los casos mencionados arriba. Se revisaron las referencias existentes de esta estrella; sin embargo, no se encontró ninguna que asignara algún tipo espectral, por lo que este trabajo es el primero en asignarle uno.



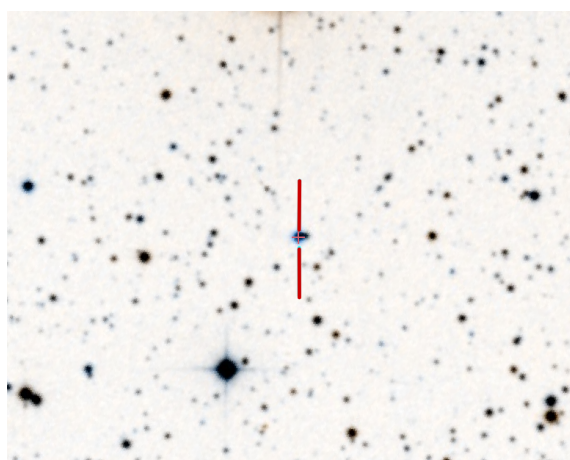
(a) Campo del objeto Cas11



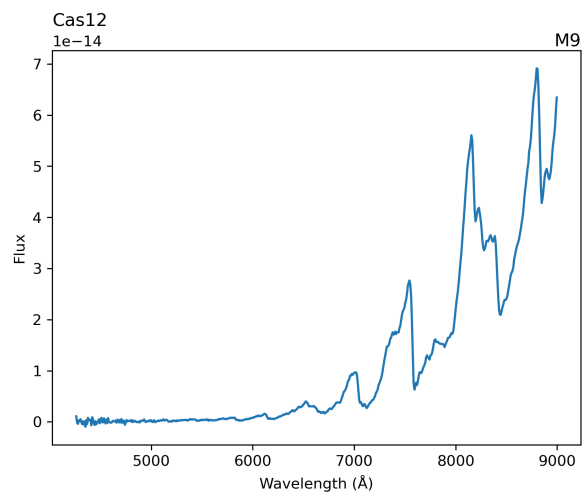
(b) Espectro del objeto Cas11.

Figura 4.11: Cas11. No se encontró $H\alpha$ en emisión y se le asignó el tipo espectral M8.

El objeto **Cas12**, clasificado como "probable"*P*, no presenta líneas en emisión visibles; sin embargo, de igual forma que el resto de objetos, en los cuales no es evidente la presencia de $H\alpha$, el tipo espectral asignado es el de una M9. La hipótesis de la confusión de las bandas propias del espectro es la explicación de que esta estrella haya sido clasificada como candidata a mostrar $H\alpha$ en emisión.



(a) Campo del objeto Cas12

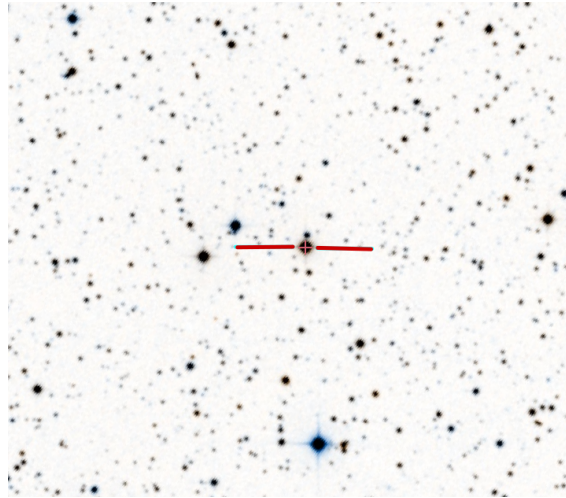


(b) Espectro del objeto Cas12. No muestra $H\alpha$ en emisión

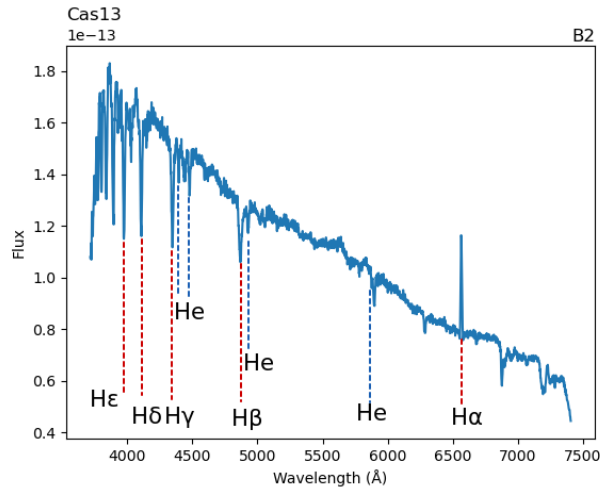
Figura 4.12: Objeto Cas12 Clasificado como M9, sin $H\alpha$ en emisión.

Para la clasificación espectral de esta estrella, **Cas13**, se tomaron en cuenta las referencias; en donde se marca que es del tipo B2. Sin embargo, el artículo de Brodskaya (1960) [4], en el cual se hace esta clasificación, no se menciona cómo se obtuvo dicha clasificación. Por otro lado, la clasificación asignada en este trabajo a esta estrella también es B2; por lo que, a pesar de no tener acceso a la investigación, se puede reforzar el tipo espectral asignado.

El objeto, clasificado como "fuerte"*S*, presenta emisión en $H\alpha$ y las líneas de absorción características de un objeto de tipo B. La serie de Balmer está marcada claramente, así como algunas líneas de helio.



(a) Campo del objeto Cas13



(b) Espectro del objeto Cas13.

Figura 4.13: Objeto Cas13 Clasificado como B2, con $H\alpha$ en emisión.

A manera de resumen, en la Tabla 4.2, se enlistan los objetos, así como el tipo espectral (T.E.) asignado en este trabajo y si identificamos $H\alpha$ en emisión en el espectro, así como la probabilidad de emisión (M.L.) dada en el artículo de Márquez-Limón (1992) [23]. También se resalta el ancho equivalente (A. Eq.) de la línea de $H\alpha$ y se coloca una nota en caso de que exista información adicional.

Objeto	T.E.	$H\alpha$ en emisión	M. L.	A. Eq.	Notas
Cas01	B2	Sí	S	-14.2972	Be
Cas02	B3	Sí	S	-29.0678	Be
Cas03	B2	Sí	S	-24.3218	Be
Cas04	M6	No	P		
Cas05	S	No	S		
Cas06	B2	Sí	W	-17.3782	Be
Cas07	M6	No	W		
Cas08	M7	No	P		
Cas09	B3	Sí	S	-36.4005	Be (Perfil doble en $H\beta$)
Cas10	G3	Sí	S	-12.0250	Candidata a estrella T Tauri
Cas11	M8	No	P		
Cas12	M9	No	P		
Cas13	B2	Sí	S	-5.9996	Be

Tabla 4.2: Características de cada uno de los objetos estudiados

En total se tienen 7 estrellas que presentan emisión, de las cuales 6 son de tipo espectral B y una de tipo G. Por otro lado, las estrellas que no presentan emisión son de tipos espectrales tardíos, M en su mayoría y solo una de tipo S, por lo que se planteó una hipótesis por la que se pueden haber confundido con estrellas en emisión, debido a la presencia de bandas alrededor en el intervalo sensible de las placas (aproximadamente de 6000 a 7000 Å). De manera general, se encontraron tres tipos de estrellas dependiendo de su clasificación espectral; a continuación se da una conclusión para cada uno de estos grupos.

4.2.2. Estrellas tipo B

Para la mayoría de los casos en los que se encontró emisión de $H\alpha$, los espectros de estos objetos son tempranos, mostrando mayor intensidad en la parte azul de su distribución espectral. Al ser analizados los espectros; también se notaron características típicas del tipo espectral B; adicionalmente, cada una de estas estrellas presenta indicios de variabilidad, por lo que son candidatas a ser estrellas Ae/Be de Herbig. No obstante, hacen falta más estudios espectroscópicos en diferente longitud de onda (principalmente en el infrarrojo), así como conocer la masa de estos objetos para poder clasificarlos como tales. Por el momento, podemos concluir que cada una de las estrellas a las cuales se les clasificó como tipo B tienen emisión en $H\alpha$, por lo que podemos suponer que son fuertes candidatos a pertenecer al grupo de estrellas jóvenes.

4.2.3. Estrellas M

En el caso de los objetos que no presentaron emisión en $H\alpha$, la mayoría de ellos es de tipo espectral M y se localizaron referencias previas acerca de su tipo espectral; sin embargo, no es claro, para todas, si la clasificación se asignó mediante observaciones espectroscópicas o bien mediante algún sistema de colores. Tampoco si se trata de espectros de placas o con CCDs.

Para la mayoría de ellos, se realizó un estudio espectroscópico en conjunto, discutido en el artículo de Ichikawa T. (1981)[16], en el cual se trabajó con espectros de placas astronómicas de manera similar a los de Tonantzintla y se utilizó un sistema llamado *Case System*, desarrollado

por Cameron D. M. (1955) [5] en el que se dan los criterios para cada subclasificación a partir de los espectros de estas estrellas; sin embargo, el intervalo de estos espectros estudiados no incluye la región de $H\alpha$; por lo que, aunque son efectivos para la clasificación estelar, no pueden determinar la emisión que se busca en este trabajo, ni si el objeto es candidato a estrella joven.

En el caso de los objetos Cas08 y Cas12, los cuales no están mencionados en el catálogo de estrellas M, se debe a que se ubican fuera de la región estudiada por dicho trabajo. Sin embargo, cuentan con un estudio por parte de Dorda R. (2018) [9] en el cual también se asigna un tipo espectral con base en estudios espectroscópicos. De manera similar al catálogo de estrellas M que trabaja con las estrellas anteriores, no centra la investigación hacia estrellas jóvenes ni tipos de emisión, por lo que este trabajo es el primero en este tipo.

Debido a que ninguno de estos objetos presenta evidencia sólida de una emisión en los 6563 Å, la hipótesis discutida de la causa por la que estos objetos se tomaron como candidatos a presentar emisión es debido al tipo espectral, ya que este presenta bandas alrededor de la longitud de onda donde debería estar la emisión. Esto, combinado con la respuesta de la emulsión y el filtro utilizados al momento de la exposición de la placa, pudo haber generado una confusión debido a la unión de dos bandas que caen en el intervalo combinado, el cual está entre los 6000 y 7000 Å, tal como se vio en las imágenes 1.1 y A.1. Esto pudo haber causado una confusión al momento de la identificación; sin embargo, hacen falta más estudios con instrumentos de mayor resolución para poder descartar por completo alguna emisión en los objetos de este tipo.

4.2.4. Estrella tipo espectral S

Para el caso de Cas05, su tipo espectral es S, un tipo tardío con emisión en el infrarrojo. Las estrellas tipo S son clasificadas como similares a las tipo M, pero con bandas notables de ZrO y emiten fuertemente en el infrarrojo. De la misma forma que las estrellas de tipo espectral M, este objeto no presenta emisión de $H\alpha$, aunque del mismo modo, presenta varias bandas dentro del intervalo 6000 a 7000 Å, por lo que también pudo haber causado una confusión en la identificación. Sin embargo, al ser de un tipo espectral tardío, otra hipótesis en este caso de la confusión de la identificación es la alta emisión en el rojo e infrarrojo. De la misma forma que el resto de objetos sin emisión, se necesitan más estudios con instrumentalización de mayor resolución para poder llegar a una conclusión.

4.2.5. Estrella T Tauri

Por otra parte, a Cas10 la hemos clasificado como una estrella de tipo G3, un tipo espectral más tardío que las demás estrellas que presentan emisión en $H\alpha$. Al comparar el espectro en el catálogo, se encontró que cumple con los requisitos para ser clasificada como una estrella T Tauri; es decir, $H\alpha$ en emisión, se encuentra cerca de una nube molecular y presenta un espectro tardío, por lo que se consideró a esta estrella como una posible T Tauri.

Resumen

Se obtuvieron espectros de 13 estrellas, de las cuales 7 presentan emisión en $H\alpha$ y 6 no. Se clasificaron 6 estrellas como tipo espectral B, otras 5 como tipo M; una de tipo S y una de tipo G (T Tauri). Ninguna de las estrellas de tipo espectral M, ni la tipo espectral S, presentaron $H\alpha$ en emisión.

En el caso particular de la estrella 09 de tipo espectral B, se notó un perfil doble dentro de la línea de $H\beta$, indicador de un posible envolvente o disco de acreción.

Ninguna de estas estrellas presentaba estudios sobre si eran o no estrellas jóvenes; sin embargo, la mayoría estaba presente en catálogos de diferentes tipos.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se llevó a cabo un estudio espectroscópico de una muestra de estrellas que habían sido clasificadas como candidatas a la población de estrellas jóvenes de Orión. Luego del análisis de las observaciones CCD, se encontró que, de los 13 objetos originalmente marcados con emisión (fuerte, débil o probable), 7 de ellos efectivamente presentan emisión en $H\alpha$, lo cual representa a poco más de la mitad de la muestra original, concluyendo así que las técnicas anteriores de clasificación por $H\alpha$ eran eficientes en un 50 %, en comparación a un estudio espectroscópico con la ayuda de algún CCD o dispositivos electrónicos. De los objetos registrados con emisión, 6 de ellos muy probablemente pertenecen al grupo de estrellas Ae/Be de Herbig. Otra posibilidad que se manejó al inicio de la investigación, era que los objetos podrían ser estrellas T Tauri; sin embargo, como se ha visto, de los resultados obtenidos, sólo una estrella en la muestra podría pertenecer a este grupo de T Tauri. Lo más probable que estos 6 objetos pertenezcan a otro grupo también asociado con las etapas tempranas en la vida de las estrellas, las Ae/Be de Herbig. EL mayor número de objetos detectados con características seguramente se debe a que estas estrellas son más masivas, más luminosas y, por lo tanto, más fáciles de detectar en las placas.

Por parte de los objetos clasificados como tipos espectrales tardíos (M y S), existe una región entre dos bandas alrededor de 6563 Å, simulando un "pico" que parecería una línea en emisión. Esto podría explicar la confusión en la selección de los espectros en las placas, seguramente los astrónomos de Tonantzintla utilizaban otro criterio para descartar este tipo de estrellas tardías, pero no encontramos ninguna referencia. Aún si este es el motivo por el que fueron seleccionados como probables miembros, no hay que descartar estos objetos por completo; ya que hay estrellas M con emisión en $H\alpha$, aunque asociadas con fuentes de rayos X. Lo que se sugiere es llevar a cabo un estudio con instrumentos de mayor resolución para corroborar la inexistencia de emisión en $H\alpha$. Adicionalmente se tiene que mantener en mente que su comportamiento podría ser variable y puede cambiar drásticamente a lo largo del tiempo.

El caso de la estrella tipo T Tauri es de gran interés debido a que no está catalogada como tal en la literatura; sin embargo, cumple con todas las características: estrella con $H\alpha$ en emisión, ubicada cerca de nubes moleculares y con tipo espectral tardío.

Por último, en el caso de la estrella Cas09, la línea de $H\beta$ presenta emisión dentro de absorción, lo cual es un indicador de un disco/envolvente alrededor de la estrella según algunos modelos de formación estelar, aunque también las estrellas Be "normales", que tienen etapas de eyección de material, el mismo que se distribuye en un disco/envolvente.

Como conclusión general, en este trabajo se confirmó la emisión en $H\alpha$ de 7 de 13 objetos candidatos, a partir del análisis de cada uno de sus espectros, y se les asignó una clasificación espectral dependiendo de las líneas o bandas presentes en el espectro observado.

Notamos que en el caso de las estrellas marcadas como "fuertes" S en el artículo de Márquez-Limón (1992)[23], la mayoría de ellas (exceptuando el objeto Cas05) muestran $H\alpha$ en emisión y los hemos clasificado como objetos Ae/Be de Herbig, siendo todos estos de tipos espectrales tempranos,

con excepción de la estrella T Tauri (Cas10). Por otro lado, los objetos marcados como "débil" W o "probable" P no presentan emisión en $H\alpha$, con excepción de la estrella Cas06, y son todos de tipos espectrales tardíos.

Esto es un buen indicador de la eficiencia de las placas al clasificar objetos con emisión intensa (S); sin embargo, con emisiones menos fuertes, probables o débiles, la emisión en $H\alpha$ puede confundirse con picos "falsos", regiones entre dos bandas, y la eficacia de la selección es casi nula.

Esto implicaría que lo ideal, en el seguimiento de estos objetos, es enfocarse sólo en aquellos donde $H\alpha$ sea marcada como intensa.

Por último, más allá de la existencia o no de la línea $H\alpha$ en emisión, lo interesante es aportar algo al conocimiento de la naturaleza de estos objetos. En el caso de los que presentan $H\alpha$ en emisión, la mayoría son de tipos espectrales tempranos, lo cual indica que son estrellas más calientes y compactas. En el caso contrario, las estrellas que no presentan la emisión son de tipos espectrales tardíos, lo cual significa que son estrellas más frías que el resto. Aunque, se debe tomar en cuenta también que pueden ser estrellas variables, por lo que deberían ser re-observadas. Se encontró, aunque sea sólo un objeto, en el otro extremo de masas y luminosidades de las estrellas, una estrella tipo T Tauri, lo que permite seguir utilizando estas placas para seleccionar objetos jóvenes.

Este trabajo se puede considerar exitoso al cumplir los objetivos generales, ya que para cada uno de los objetos se obtuvo su emisión o falta de ella y, adicionalmente, se le asignó un tipo espectral. Así mismo, se demuestra la gran diferencia que hay en la eficiencia de las observaciones con el CCD y con las placas.

Sin embargo, también se reafirma la gran eficiencia de las placas para encontrar emisión de $H\alpha$ únicamente en casos donde la emisión es muy intensa, debido a que todas las estrellas marcadas como S en el artículo de Márquez-Limón et al. (1992) [23] efectivamente presentan emisión en $H\alpha$; por lo que, al menos en estos casos, era posible clasificar estrellas particulares. Desde luego que el número de objetos que se puede identificar en una sola placa es muy grande, así que lo mejor es combinar ambas técnicas.

5.1. Trabajo a futuro

Casos particulares como el de la estrella 09 podrían dar trabajo investigando el envolvente del que se tiene cierta evidencia con el perfil doble. Se puede estimar, por ejemplo, la velocidad de rotación.

De igual manera, el conjunto de las estrellas M debe ser estudiado con instrumentación de mayor resolución para que queden descartadas completamente de algún tipo de emisión en $H\alpha$. También es necesario estudiar la estrella candidata a T Tauri, debido a que no estaba catalogada como tal en ningún trabajo anterior al momento de la publicación de esta tesis. Se puede, por ejemplo, estudiar todo este conjunto de estrellas en otras bandas, para obtener su distribución de energía espectral y, por ejemplo, verificar si existen excesos de emisión en UV o IR, de esta manera, se puede saber más de su naturaleza y estado evolutivo.

Apéndice A

Placa original del OANTON

Placa en $H\alpha$ AC 2845, con una emulsión 103 a-E (intervalo de sensibilidad efectiva de 550-660 nm) en conjunto con un filtro Wratten 2-29, centrada en las coordenadas $\alpha = 0 : 53 : 00$ $\delta = +59 : 45 : 00$ (Casiopea), expuesta durante 10 minutos en noviembre de 1952 desde el OANTON, utilizando la Cámara Schmidt, con el prisma objetivo.

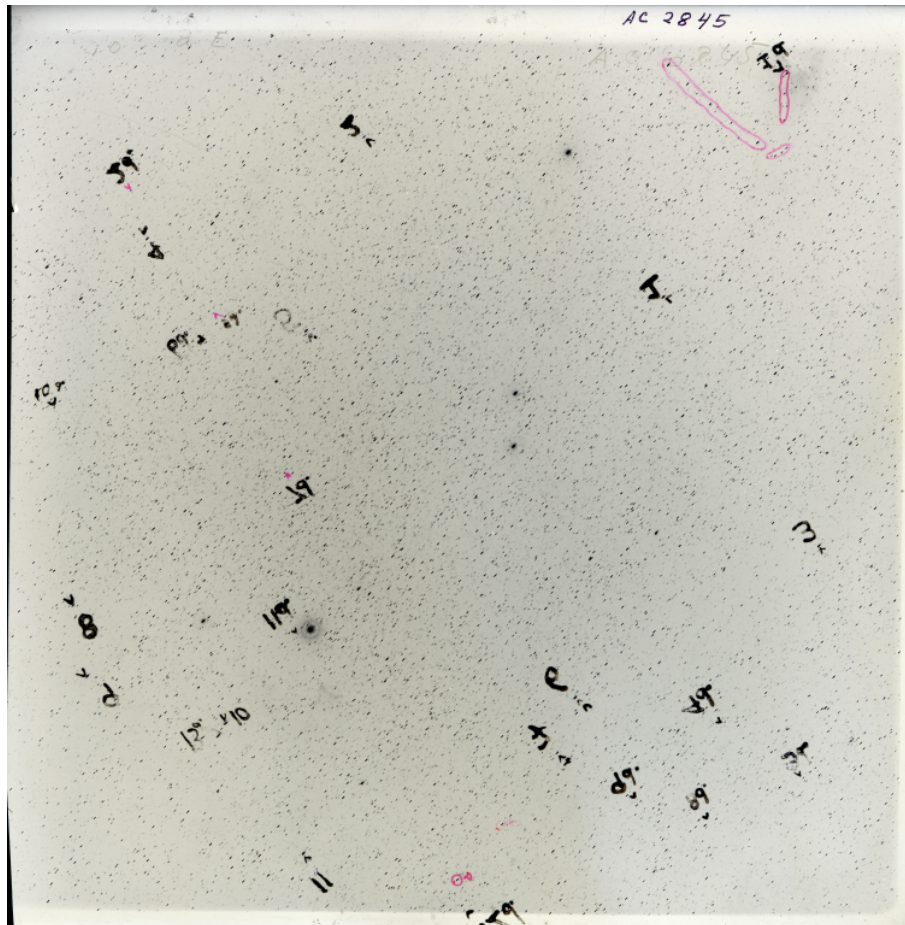
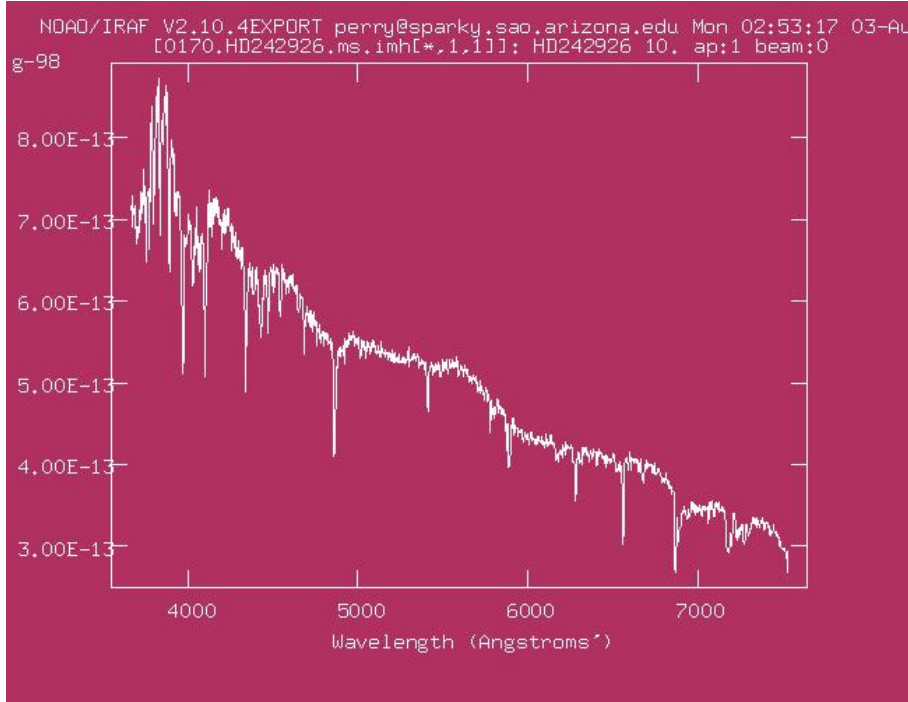


Figura A.1: Placa original del campo en Casiopea de la cual se obtuvieron los candidatos registrados en Márquez-Limón et al., (1992)[23]

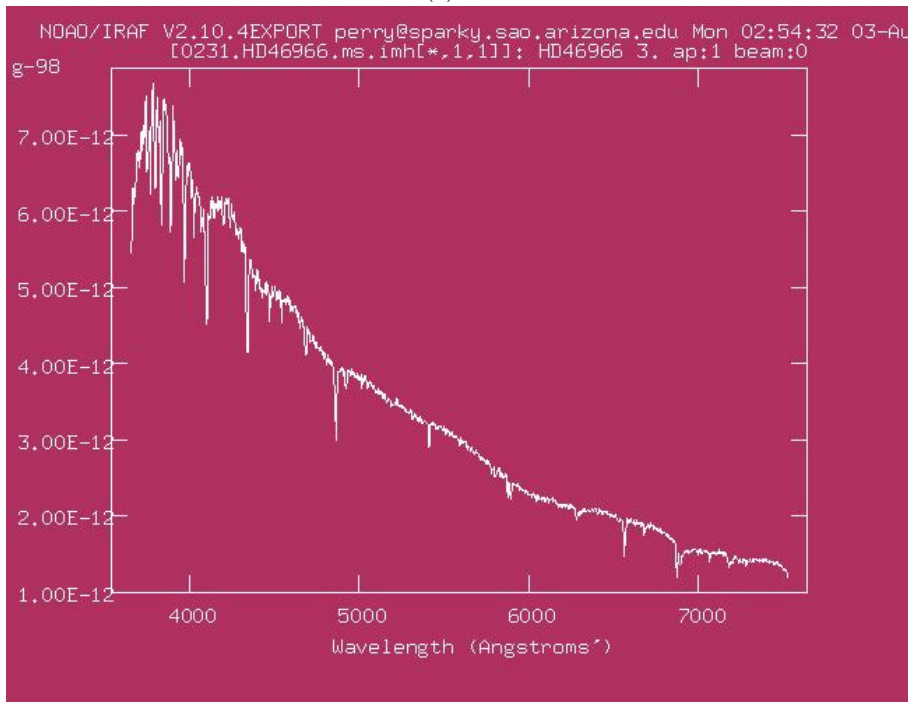
Apéndice B

Espectros de comparación

A continuación se muestran los espectros de comparación recuperados de la página de Perry Berlind [3], los cuales sirvieron de ayuda para clasificar las estrellas estudiadas. En estos espectros se muestra cómo la clasificación va de las estrellas más calientes hacia las más frías. También se muestran espectros especiales con los que fueron comparados los objetos que no coincidían con el resto de la clasificación de Harvard.

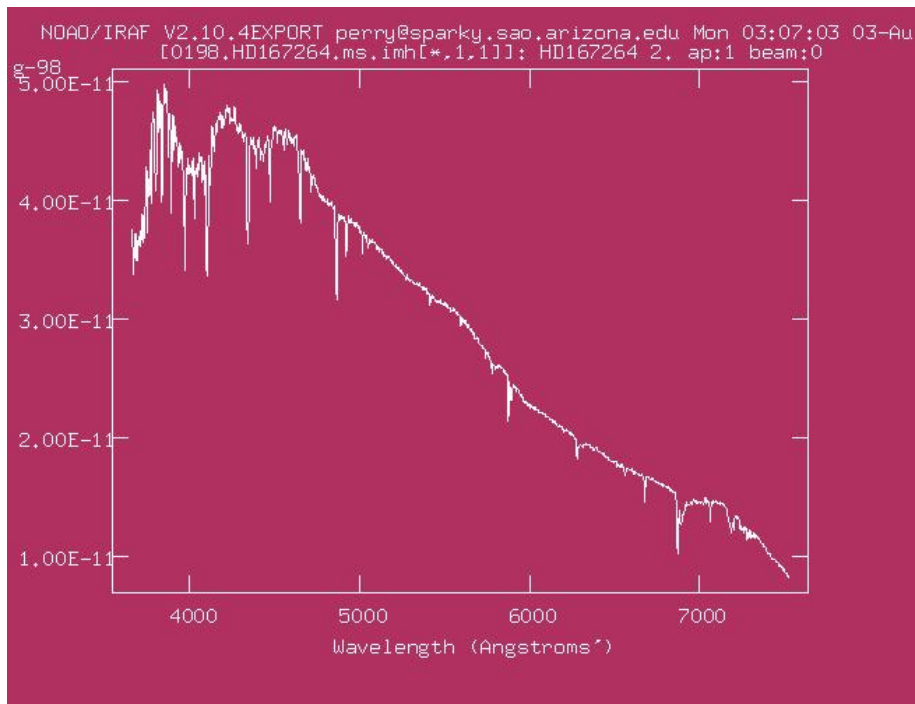


(a) O7

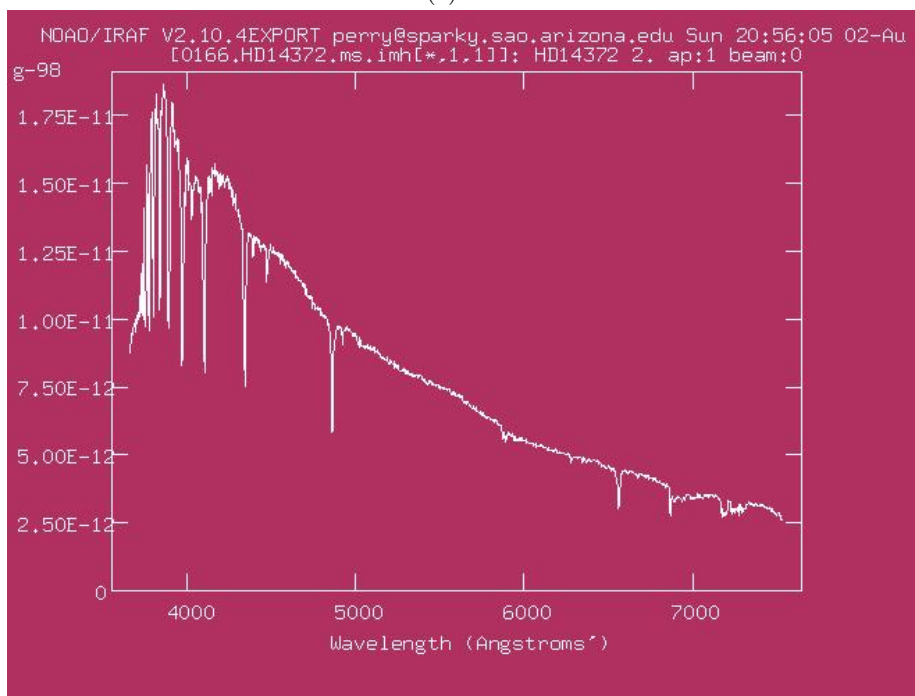


(b) O8

Figura B.1: Espectros de comparación de estrellas tipo espectral O7 y O8

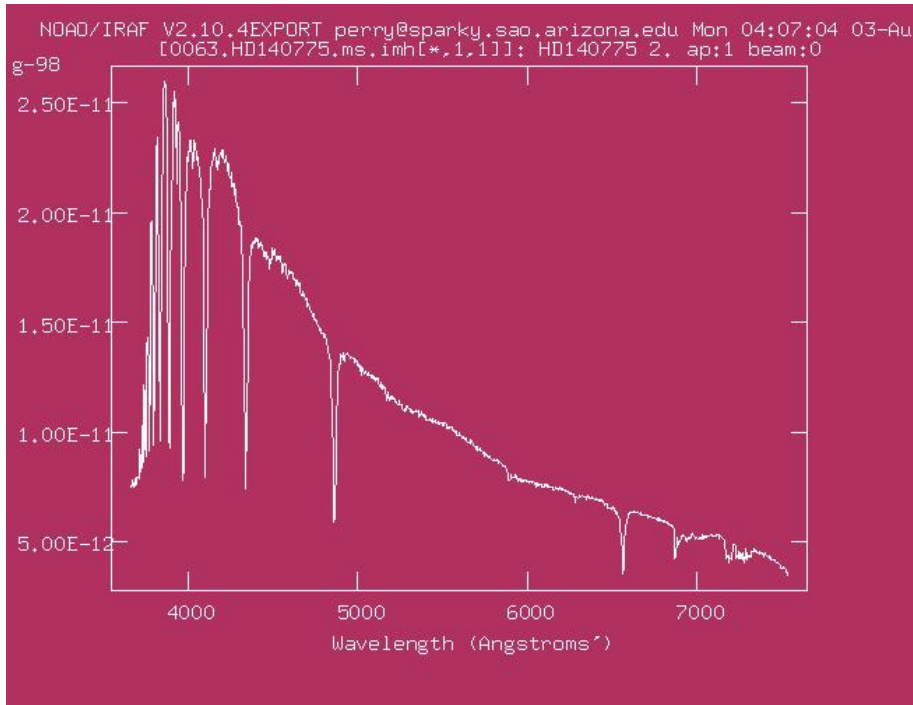


(a) B0

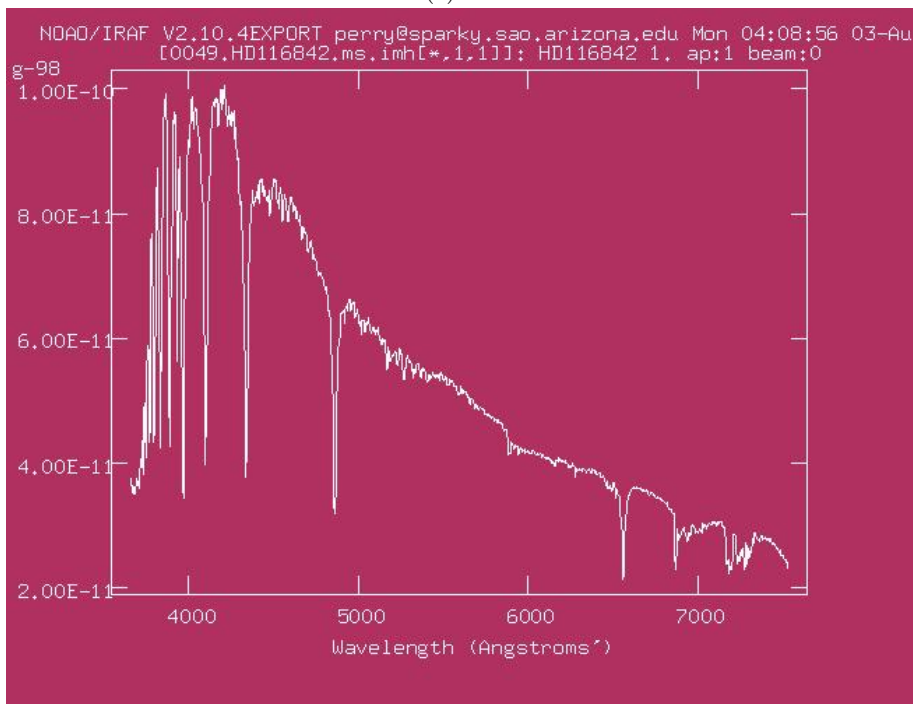


(b) B5

Figura B.2: Espectros de comparación de estrellas tipo espectral B

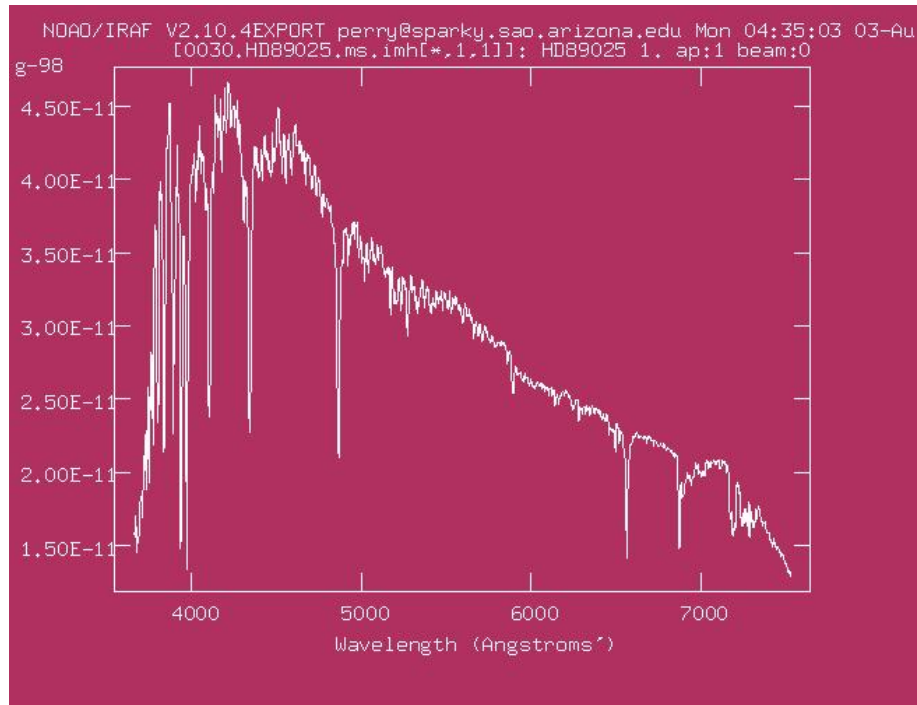


(a) A0

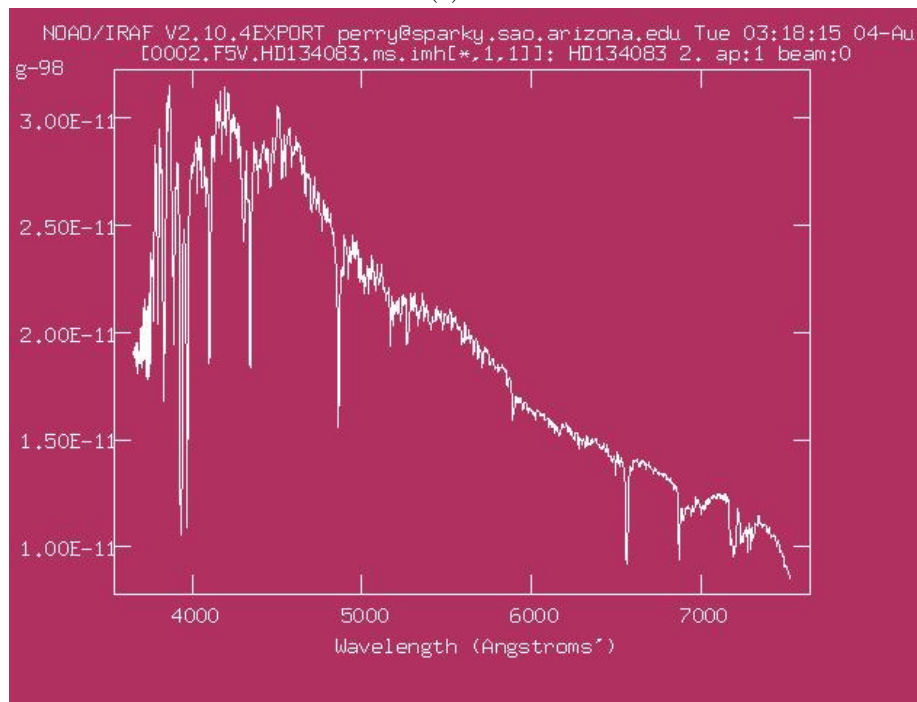


(b) A5

Figura B.3: Espectros de comparación de estrellas tipo espectral A0 y A5

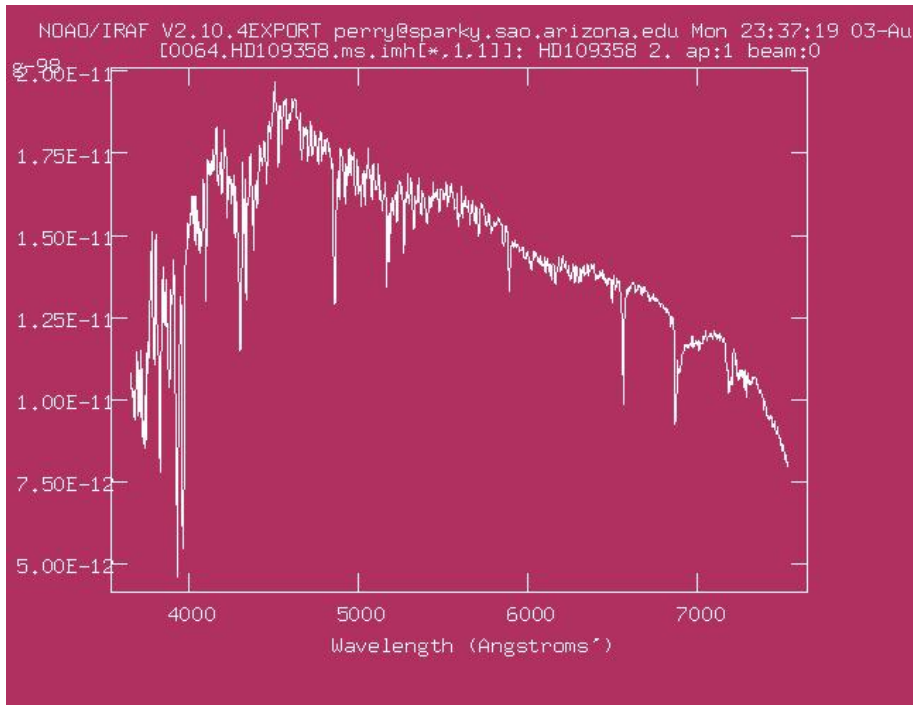


(a) F0

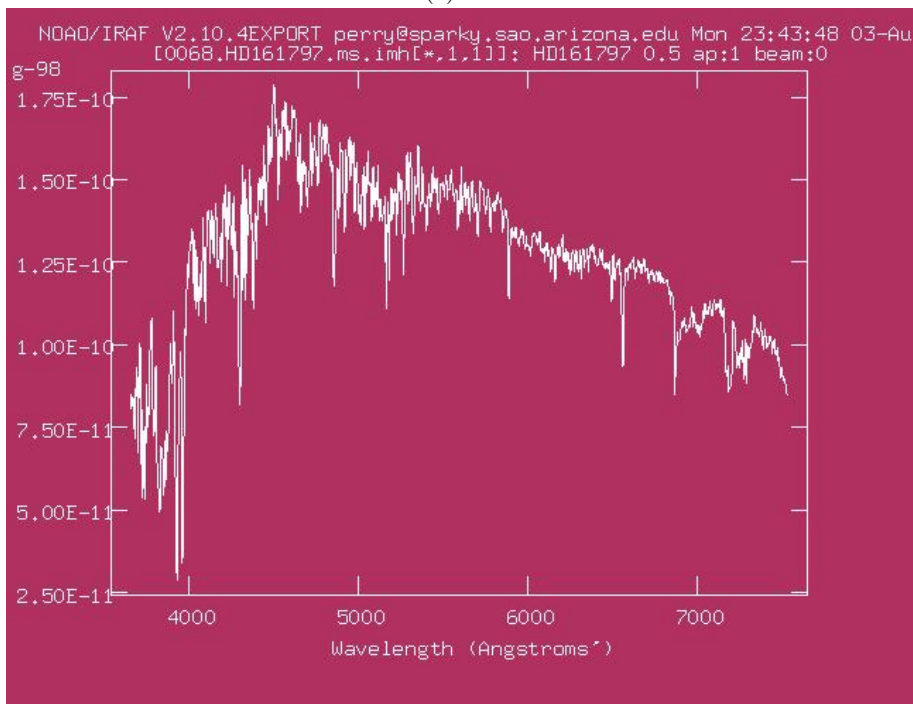


(b) F5

Figura B.4: Espectros de comparación de estrellas tipo espectral F

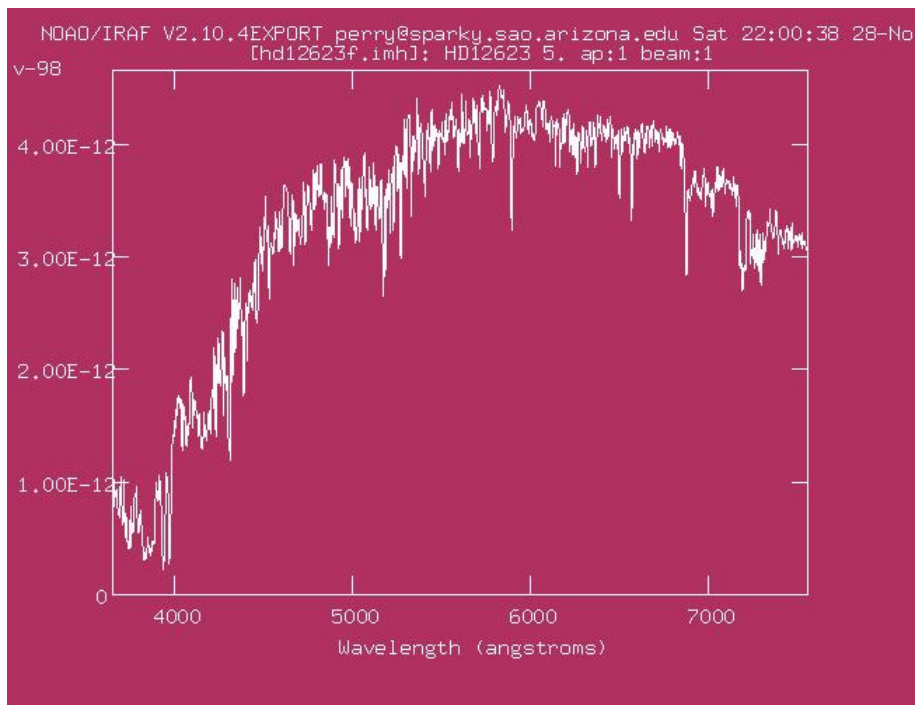


(a) G0

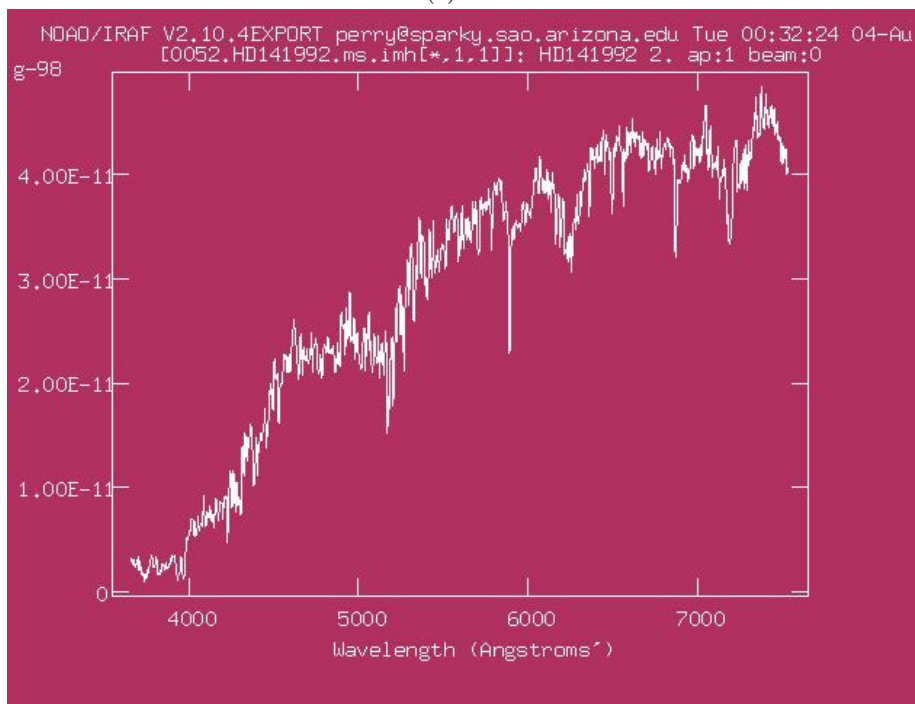


(b) G5

Figura B.5: Espectros de comparación de estrellas tipo espectral G

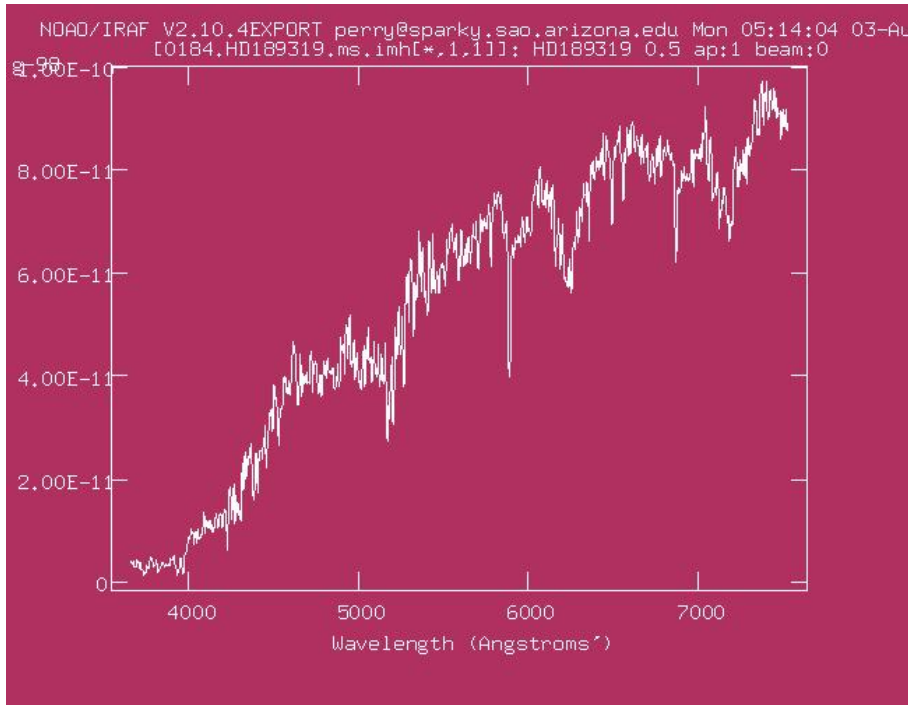


(a) K0

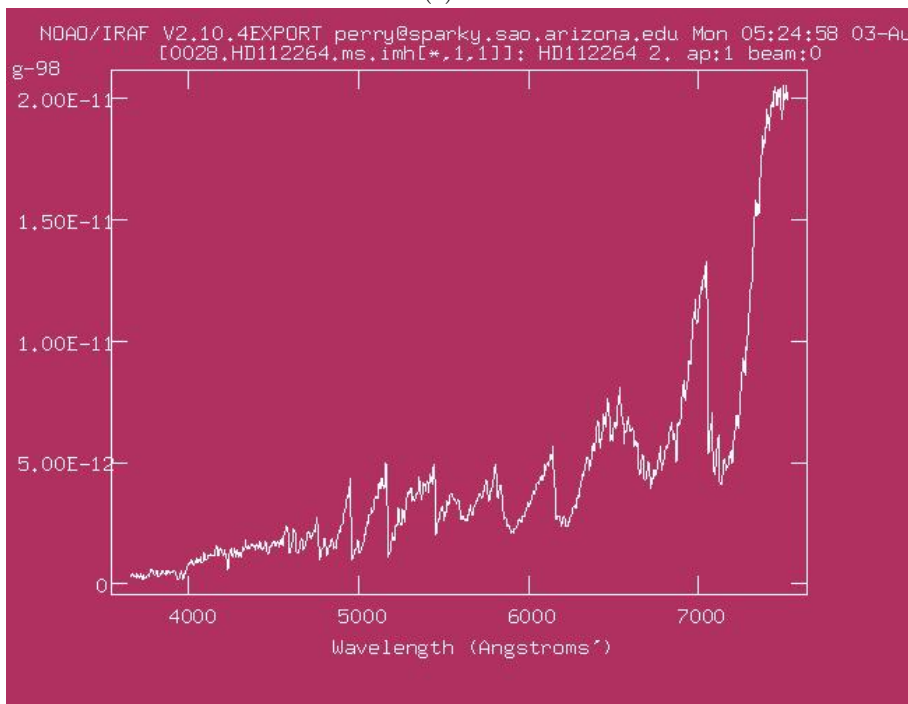


(b) K5

Figura B.6: Espectros de comparación de estrellas tipo espectral K

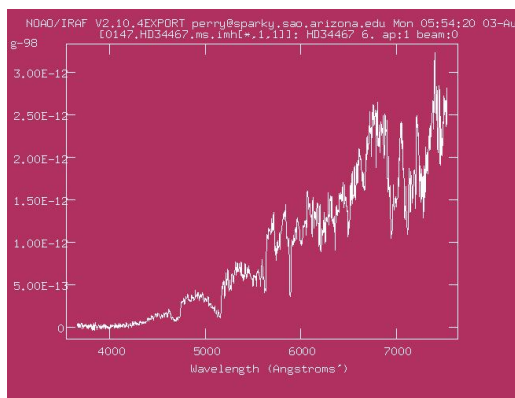


(a) M0

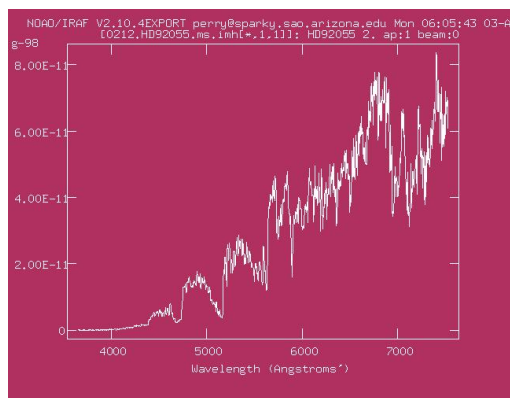


(b) M5

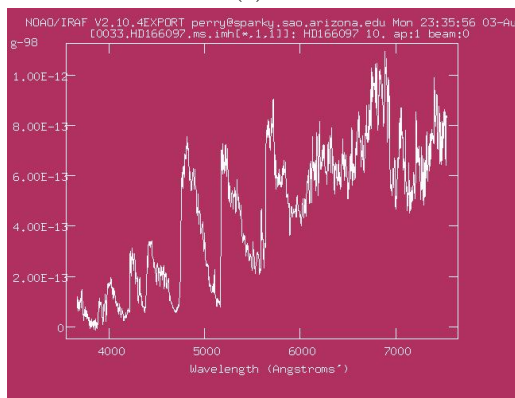
Figura B.7: Espectros de comparación de estrellas tipo espectral M



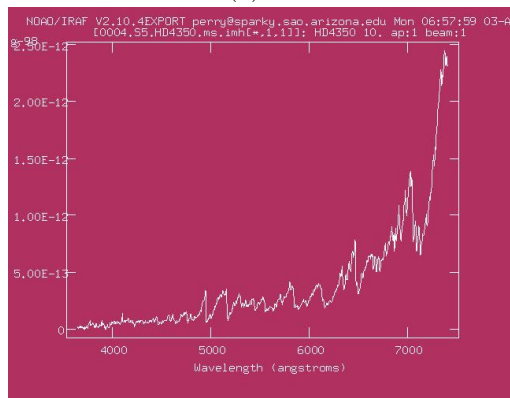
(a) C



(b) N2



(c) R5



(d) S5

Figura B.8: Espectros de comparación de estrellas de tipo S y C (con subclases R y N de las tipo C)

Apéndice C

Modelo rotacional de Struve

Struve (1930) [33] presentó un modelo explicando el fenómeno de líneas de emisión en las estrellas tipo B con rápida rotación, en el cual habla de la presencia de líneas de emisión dentro de líneas de absorción causadas por una envoltura de material el cual re-emite en la misma longitud de onda que la atmósfera de la estrella absorbe. Esto, como explica Slettebak (1988) [32], provoca líneas dobles o picos de emisión dentro de líneas de emisión, cuya forma depende del punto de vista desde donde sea observada la estrella.

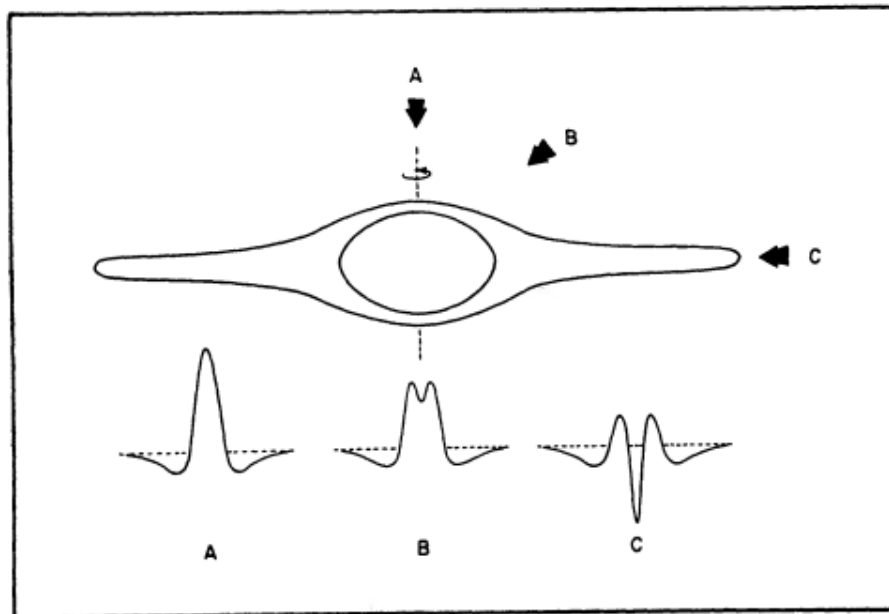


Figura C.1: Modelo rotacional de Struve, donde se explica el perfil de cada línea dependiendo desde donde sea observada

Bibliografía

- [1] I. Appenzeller and R. Mundt. T tauri stars. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 1(1):291–334, 1989.
- [2] U. Bastian, U. Finkenzeller, C. Jaschek, and M. Jaschek. The definition of T Tauri and Herbig Ae/Be stars. , 126(2):438, October 1983.
- [3] Perry Berlind. Fast stellar spectral atlas. <https://lweb.cfa.harvard.edu/~pberlind/atlas/atframes.html>, 2003. Página consultada el 15 de abril de 2025.
- [4] E. S. Brodskaya. Spectra, photographic magnitudes and colour indices of 3206 stars in Cassiopeiae. *Izvestiya Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Krymskoj Astrofizicheskoj Observatorii*, 24:160, January 1960.
- [5] D. M. Cameron and J. J. Nassau. Classification of Late M-Type Stars from Low-Dispersion Spectra in the Near Infrared. , 122:177, July 1955.
- [6] Paul Clark. Spectral classification, n.d. Recuperado el 13 de mayo de 2025.
- [7] G. V. Coyne and D. J. MacConnell. A survey for H-alpha emission objects in the Milky Way. VII. Final zones. *Vatican Observatory Publications*, 1(6):73, January 1983.
- [8] P. Cruzalèbes, R. G. Petrov, S. Robbe-Dubois, J. Varga, L. Burtscher, F. Allouche, P. Berio, K. H. Hofmann, J. Hron, W. Jaffe, S. Lagarde, B. Lopez, A. Matter, A. Meilland, K. Meisenheimer, F. Millour, and D. Schertl. A catalogue of stellar diameters and fluxes for mid-infrared interferometry. , 490(3):3158–3176, December 2019.
- [9] R. Dorda, I. Negueruela, and C. González-Fernández. The red supergiant population in the Perseus arm. , 475(2):2003–2015, April 2018.
- [10] R. Díaz Hernández. *Análisis espectrofotométrico de las placas astronómicas de la cámara Schmidt de Tonantzintla*. PhD thesis, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México, 2005.
- [11] G. González and G. González. Estrellas Be-Ae en Casiopea y PerseoEstrellas Be-Ae en Casiopea y PerseoBe and Ae Stars in Perseus and Cassiopea. *Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya*, 1:3–20, January 1954.
- [12] Harry H. Guetter and David G. Turner. IC 1590, A Young Cluster Embedded in the Nebulosity of NGC 281. , 113:2116, June 1997.
- [13] J. Hardorp, K. Rohlf, A. Slettebak, and J. Stock. Luminous stars in the Northern Milky Way. Part I. *Hamburger Sternw. Warner & Swasey Obs.*, C01:0, January 1959.
- [14] G. H. Herbig. The Properties and Problems of T Tauri Stars and Related Objects. *Advances in Astronomy and Astrophysics*, 1:47–103, January 1962.

- [15] G. H. Herbig and N. Kameswara Rao. Second Catalog of Emission-Line Stars of the Orion Population. , 174:401, June 1972.
- [16] T. Ichikawa. The space distribution of M giants in the direction of Cas. , 33:107–133, January 1981.
- [17] Óptica y Electrónica Instituto Nacional de Astrofísica. Quiénes somos, 2025. Consultado el 31 de marzo de 2025.
- [18] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Espectrofotómetro lfosc. <https://astro.inaoep.mx/observatorios/oagh/espectrofotometro-lfsoc>, 2021. Última actualización: 22 de septiembre de 2021. Página consultada el 15 de abril de 2025.
- [19] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Espectrógrafo boller & chivens. <https://astro.inaoep.mx/observatorios/oagh/espectrografo-boller>, 2021. Última actualización: 22 de septiembre de 2021. Página consultada el 15 de abril de 2025.
- [20] H. Karttunen, Pekka Kröger, Heikki Oja, Markku Poutanen, and Karl Johan Donner. *Fundamental Astronomy*. 2017.
- [21] L. Kohoutek and R. Wehmeyer. Catalogue of H-alpha emission stars in the Northern Milky Way. , 134:255–256, January 1999.
- [22] Jonathan Labadie-Bartz, Gerald Handler, Joshua Pepper, Luis Balona, Peter De Cat, Daniel J. Stevens, Michael B. Lund, Keivan G. Stassun, Joseph E. Rodriguez, Robert J. Siverd, David J. James, and Rudolf B. Kuhn. New Beta Cephei Stars from the KELT Project. , 160(1):32, July 2020.
- [23] A. Marquez-Limon, M. G. Lopez-Molina, and C. Chavarría-K. New probable members of the young Orion stellar population. I. The obscured regions in Cassiopeia, VELA and Scorpius. , 95:391–396, November 1992.
- [24] P. W. Merrill. Stellar spectra of class S. , 56:457–482, December 1922.
- [25] R. Naranjo-Romero. *Implementación de la retroalimentación de las estrellas recién nacidas sobre la nube madre*. PhD thesis, 06 2011.
- [26] J. J. Nassau, V. M. Blanco, and W. W. Morgan. Reddened Early m- and S-Type Stars Near the Galactic Equator. , 120:478, November 1954.
- [27] Roberto Nesci, Taavi Tuvikene, Corinne Rossi, Silvia Gaudenzi, Silvia Galletti, Paolo Ochner, Harry Enke, and . Agb candidates in the field of gamma cas, 2018.
- [28] Alvaro qc. Hr diagram (based on image:hrdiagram.png). <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4044408>, n.d. Self-made, based on Image:HRDiagram.png. Licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 (CC BY-SA 3.0).
- [29] B. Cameron Reed. Catalog of galactic ob stars. *The Astronomical Journal*, 125(5):2531, may 2003.
- [30] Arnold Schwassmann and P. J. van Rhijn. *Bergedorfer Spektral-Durchmusterung der 115 noerdlichen Kapteynschen Eichfelder - Bd.1: Eichfeld 1 bis 19, Deklination +90 deg., +75 deg., +60 deg.* 1935.
- [31] Frank H. Shu, Fred C. Adams, and Susana Lizano. Star formation in molecular clouds: observation and theory. , 25:23–81, January 1987.
- [32] Arne Slettebak. The Be Stars. , 100:770, July 1988.
- [33] O. Struve. On the axial rotation of stars. , 72:1–18, July 1930.