

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DEL
ESPECTÓGRAFO LHIRES III DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO
DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA PARA UNA
REJILLA DE DIFRACCIÓN DE MEDIANA RESOLUCIÓN**

JUAN DAVID CORTÉS OSSA

YOSELIN LÓPEZ RESTREPO



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Facultad de Ingenierías
Programa de Ingeniería Física
Pereira, Diciembre de 2019

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DEL
ESPECTROGRAFO LHIRES III DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO
DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA PARA UNA
REJILLA DE DIFRACCIÓN DE MEDIANA RESOLUCIÓN**

Trabajo de grado presentado por

**Juan David Cortés Ossa
Yoselin López Restrepo**

COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIEROS FÍSICOS

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

MsC. Iván Dario Arellano Ramírez

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Facultad de Ingenierías
Programa de Ingeniería Física
Pereira, Diciembre de 2019

Dedicatoria

*Dedicado a:
Juan Martín,
que es mi paz y mi luz.
Yoselin López Restrepo*

*Dedicado a:
Dora Luz, Fernando y Mariana,
quienes hicieron posible este sueño...
A mi abuela que hoy lo ve cumplido desde lo más alto.
Juan David Cortés Ossa*

Agradecimientos

Damos nuestros más sinceros agradecimientos al grupo de investigación en Astroingeniería Alfa Orión por acogernos durante este proceso de formación. Al M.Sc. Edwin A. Quintero director del grupo de investigación por toda su disposición y acompañamiento a lo largo de este proyecto. Al M.Sc. Iván D. Arellano director de este trabajo, por su paciencia, orientación y apoyo en el desarrollo de cada una de las etapas de esta investigación. Agradecemos también de manera especial al profesional investigador Jairo A. Aguirre quien acompañó cada una de las noches de observación y quien estuvo siempre disponible para asesorarnos con todos los requerimientos técnicos e instrumentales.

Queremos agradecer a todos los profesores y compañeros del programa de Ingeniería Física que hicieron parte de nuestro proceso formativo a lo largo de estos años los cuales nos dejaron muchas enseñanzas para nuestro crecimiento profesional y personal.

Agradecemos a nuestras familias por su paciencia en el desarrollo de este trabajo, porque siempre desde el seno de nuestro hogares sentimos el apoyo y la fuerza necesaria para continuar en cada una de las dificultades que en el camino se presentaron. Infinitas gracias a ellos por ser el motor que nos impulsó en cada una de las largas noches, tanto las de observación, como aquellas que pasamos escribiendo estas líneas.

Resumen

Este trabajo presenta la metodología desarrollada para la calibración en flujo y en longitud de onda del espectrógrafo *LHRES III* de la Universidad Tecnológica de Pereira para una rejilla de difracción de mediana resolución. Se recogen los procedimientos de caracterización y configuración de los componentes ópticos de este instrumento. La calibración en longitud de onda se realizó mediante la identificación de líneas de emisión de las lámparas de neón y neón-argón del espectrógrafo así como las lámparas de emisión de hidrógeno, helio y mercurio del laboratorio de Física III de la Universidad Tecnológica de Pereira. Se seleccionaron dos estrellas estandar para la calibracion en flujo: *HD214923* y *HD198001*; las imagenes espectrales fueron procesadas mediante el software de reducción y análisis de imágenes astronómicas *IRAF*.

La validación de la metodología se efectuó mediante la adquisición de imágenes espectrales de tres objetos *HD168723*, *HD219615* y *HD206778*, los cuales están incluidos en el catálogo de espectros estelares *MILES* con el cual fueron finalmente comparados. Las regiones del espectro electromagnético estudiadas corresponden a rangos en los cuales se evidencian líneas de absorción características como el doblete de sodio, el triplete de magnesio y la línea H alpha de la serie de Balmer. Los resultados obtenidos demuestran que la metodología desarrollada cumple con las condiciones necesarias para realizar espectroscopía de mediana resolución con el espectrógrafo *LHRES III* y la configuración instrumental del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira

Contenido

Resumen	III
Lista de Figuras	V
Lista de Tablas	VII
1 Preliminares	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Antecedentes	4
2 Marco Teórico	9
2.1 Radiación Electromagnética	9
2.2 Líneas espectrales	10
2.2.1 Transiciones atómicas	10
2.2.2 Tipos de espectros	10
2.2.3 Información contenida en las líneas espectrales	11
2.3 Clasificación espectral	13
2.3.1 Sistema Harvard	13
2.3.2 Sistema Morgan-Keenan	13
2.3.3 Diagrama Hertzsprung-Russell	14
2.4 Líneas de Balmer	14
3 Metodología	17
3.1 Instrumentación	17
3.1.1 Telescopio	17
3.1.2 Espectrógrafo LHIRES III	18
3.1.3 Detector CCD	20
3.1.4 Cámara guía	21
3.1.5 Software	23
3.2 Identificación de la rejilla de difracción	25

CONTENIDO	V
3.3 Instalación de rejilla de mediana resolución	26
3.4 Ajuste del lente colimador	29
3.5 Adquisición de espectros de calibración	30
3.5.1 Tornillo micrométrico	30
3.5.2 Lámparas de calibración internas	30
3.5.3 Lámparas de calibración de laboratorio	37
3.6 Identificación de líneas espectrales	37
3.7 Montaje Instrumental	42
3.8 Captura y reducción de espectros	42
3.8.1 Preprocesamiento	42
3.8.2 Calibración en Longitud de Onda	45
3.8.3 Calibración en Flujo	45
4 Resultados	48
4.1 Curva de calibración	48
4.2 Actualización Software <i>Lambda For LHIRES III</i>	52
4.3 Validación de la metodología	53
5 Conclusiones	60
A Entorno LAMBDA FOR LHIRES III	62
B Estrellas estándar de IRAF para calibración en flujo	69
C Observatorios Astronómicos incluidos en la base de datos de <i>IRAF</i>	73

Listado de Figuras

2.1	Espectro Electromagnético	9
2.2	Tipos de espectros	11
2.3	Representación de bandas moleculares espetrales de CaH y TiO	12
2.4	Diagrama Hertzsprung-Russell	15
3.1	Telescopio MEADE LX200 16" Schmidt-Cassegrain	18
3.2	Sistema Óptico de los telescopios <i>MEADE Schmidt-Cassegrain</i>	19
3.3	Esquema básico del espetrógrafo <i>LHRES III</i>	20
3.4	Diseño Littrow, <i>Especrógrafo LHRES III</i>	21
3.5	Cámara <i>SBIG</i> modelo <i>STF-8300</i>	22
3.6	Cámara <i>SBIG</i> modelo <i>ST-i</i>	22
3.7	Herramientas computacionales	24
3.8	Difracción en una rejilla	25
3.9	Módulo Rejilla de Difracción, espetrógrafo <i>LHRES III</i>	27
3.10	Esquema experimento difracción para rejilla de mediana resolución	27
3.11	Primer paso extracción rejilla de difracción	28
3.12	Vista interna del compartimento de la rejilla de difracción	28
3.13	Ajuste lente colimador	29
3.14	Relación tornillo micrométrico y rejilla de difracción	30
3.15	Espectro Ne posición 08.50 mm	31
3.16	Espectro Ne posición 09.10 mm	32
3.17	Espectro Ne posición 09.70 mm	32
3.18	Espectro Ne posición 10.30 mm	32
3.19	Espectro Ne posición 10.90 mm	32
3.20	Espectro Ne posición 11.50 mm	33
3.21	Espectro Ne rango visible	33
3.22	Extracción carcaza lateral	34
3.23	Tornillos módulo de calibración	34
3.24	Extracción del módulo de calibración	35
3.25	Módulo de calibración espetrógrafo <i>LHRES III</i>	35
3.26	Espectro de emisión Ne-Ar en la posición 06.60 mm	36
3.27	Espectro de emisión Ne-Ar en la posición 07.40 mm	36
3.28	Espectro de emisión Ne-Ar en la posición 08.70 mm	36

3.29 Montaje Instrumental Laboratorio	37
3.30 Espectros de emisión de la lámpara de Helio	38
3.31 Espectros de emisión de la lámpara de Mercurio	39
3.32 Espectros de emisión de la lámpara de Hidrógeno	40
3.33 Perfil espectral <i>Matlab</i> con base de datos del <i>NIST</i>	41
3.34 Comparación líneas espectrales experimentales vs base de datos del <i>NIST</i>	41
3.35 Montaje instrumental para adquisición de espectros astronómicos	43
3.36 Procedimiento de ajuste del foco de la cámara guía	44
3.37 Curva de extinción atmosférica Kitt Peak vs Cerro Tololo. Gráfica tomada de [25]	46
4.1 Línea de emisión del Ne centrada en el campo	49
4.2 Curva de calibración	52
4.3 Espectro de la estrella HD168723 en el rango 4951Å - 5639Å	53
4.4 Espectro de la estrella HD168723 en el rango 5680Å - 6350Å	54
4.5 Espectro de la estrella HD168723 en el rango 6261Å - 6922Å	54
4.6 Espectro de la estrella HD219615 en el rango 4948Å - 5639Å	55
4.7 Espectro de la estrella HD219615 en el rango 5973Å - 6520Å	55
4.8 Espectro de la estrella HD219615 en el rango 6500Å - 6640Å	56
4.9 Espectro de la estrella HD219615 en el rango 6626Å - 7289Å	56
4.10 Espectro de la estrella HD206778 en el rango 5613Å - 6283Å	57
4.11 Espectro de la estrella HD206778 en el rango 6463Å - 6663Å	57
A.1 Ventana de Inicio Software <i>Lambda For LHIRES III V 2.0</i>	63
A.2 Ventana de selección de rejilla de difracción	64
A.3 Configuración Tornillo micrométrico LAMBDA FOR LHIRES III	65
A.4 Calculo posición tornillo micrométrico LAMBDA FOR LHIRES III	66
A.5 Entorno gráfico para la estimación de temperaturas.	67
A.6 Esquema general <i>Lambda For LHIRES III V 2.0</i>	68

Lista de Tablas

2.1	Características de los tipos espectrales	16
2.2	Líneas espectrales de la serie de Balmer	16
3.1	Especificaciones Técnicas Telescopio <i>MEADE LX200 16" Schmidt-Cassegrain</i>	19
3.2	Especificaciones Técnicas Cámara <i>SBIG STF-8300</i>	23
3.3	Mediciones para cálculo del parámetro R de la rejilla de difracción	26
3.4	Estrellas seleccionadas para validación	44
4.1	Lineas de emisión identificadas y su correspondiente posición del tornillo micrométrico	51
4.2	Líneas de absorción identificadas en las atmósferas estelares	59
B.1	Estrellas estandar de <i>IRAF</i> para calibración en flujo	72
C.1	Observatorios en base de datos de <i>IRAF</i>	74

Capítulo 1

Preliminares

1.1 Introducción

La astronomía ha estado ligada al desarrollo de numerosas culturas desde la antigüedad y fue esta la que sentó las bases de los métodos científicos que permiten explicar los fenómenos físicos que ocurren en el universo. Esta ciencia tiene como objeto de estudio el comportamiento y las propiedades de los cuerpos celestes. La espectroscopía es una de las herramientas fundamentales a disposición de los astrónomos la cual les permite determinar la composición química, propiedades físicas, y velocidades radiales de fuentes astronómicas a través del análisis cuantitativo de las características de las líneas espectrales. También es el medio utilizado para medir el contenido de materia oscura en galaxias, las masas de sistemas estelares binarios, la masa de cúmulos galácticos, la tasa de expansión del universo o descubrir exoplanetas orbitando alrededor de estrellas, todo esto utilizando el efecto Doppler.

El Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con los equipos necesarios para realizar estudios espectroscópicos, entre los cuales podemos destacar el telescopio *MEADE LX200 16"* que integra un dispositivo GPS que permite determinar con precisión la posición del telescopio para facilitar el seguimiento de los objetos observados, un espectrógrafo *LHRES III* de tipo *littrow* distribuido por la marca francesa *Shelyak Instruments* diseñado para telescopios de 6" a 16", está equipado con dos lámparas de calibración internas de neón y neón-argón, también está dotado de una rejilla de difracción de 2400 líneas/mm para alta resolución pero permite adaptar rejillas de 150 y 300 líneas/mm para baja resolución, 600 y 1200 líneas/mm para mediana resolución.

Las rejillas de difracción hacen posible la separación de la luz que proviene de los cuerpos celestes en las diferentes longitudes de onda que la componen. Esta luz es capturada con una cámara *SBIG STF 83000* de 8.3 Megapíxeles que incorpora un sensor *CCD* y está provista de un sistema de refrigeración interno controlado por software que reduce considerablemente el ruido térmico que podría estar presente en las imágenes. Estas imágenes son almacenadas

en formato *FITS* digital para su posterior procesamiento y análisis. Las imágenes adquiridas presentan efectos de ruido provenientes de diferentes fuentes, ruidos térmicos provenientes de los circuitos electrónicos, ruidos provenientes de efectos ambientales, ruidos externos como la presencia de rayos cósmicos, motas de polvo presentes al momento de la captura de la imagen o la no homogeneidad en la sensibilidad de los píxeles del sensor, estos ruidos pueden ser tanto aditivos como multiplicativos. Por este motivo es necesario realizar inicialmente un pre-procesamiento para obtener una imagen limpia que permita extraer la información relevante contenida en el espectro.

La identificación de las líneas de emisión de las lámparas de calibración internas del especlógrafo y las lámparas de emisión del laboratorio de Física III del departamento de Física de la Universidad Tecnológica de Pereira, se realiza mediante la comparación del perfil espectral obtenido experimentalmente con el perfil espectral recreado a partir de la base de datos del *National Institute of Standards and Technology - NIST*, con esto se procede a realizar la calibración del tornillo micrométrico en función de la longitud de onda mediante el software *Image Reduction and Analysis Facility (IRAF)* desarrollado por el *Observatorio Nacional de Astronomía Óptica (NOAO)*, en Estados Unidos, que está diseñado para el procesamiento y reducción de imágenes astronómicas

En este trabajo se presenta la metodología desarrollada para la calibración en flujo y en longitud de onda del especlógrafo *LHRES III* utilizando una rejilla de difracción de mediana resolución.

1.2 Justificación

El Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira adquirió una rejilla de difracción de mediana resolución para su uso en el especlógrafo *LHRES III*, por lo cual se identifica la necesidad de desarrollar una metodología que permita correlacionar la posición del tornillo micrométrico selector y la longitud de onda que se desea estudiar con la configuración de esta nueva rejilla.

Por otra parte, dado que la espectroscopía astronómica es un campo con una gran cantidad de aplicaciones, este trabajo permite al Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira, y a otros observatorios en el país y en el mundo, equipados con un instrumento óptico como el especlógrafo *LHRES III*, contar con una serie de procedimientos desarrollados en esta metodología para la calibración de este equipo con una rejilla de mediana resolución.

Es también de mucho valor para el grupo de investigación en Astro Ingeniería Alfa Orión ya que los estudios en la línea de espectroscopía astronómica se podrán realizar con una

alta confiabilidad en los datos obtenidos en campos que no se pueden actualmente y que la espectroscopía de mediana resolución permite desarrollar; propiciando de esta manera el desarrollo de la investigación en astronomía, especialmente en el país, en lo que respecta al estudio observacional del espectro de cuerpos celestes, que es fundamental para comprender y analizar las propiedades físicas de ellos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología que permita calibrar en flujo y en longitud de onda, el espectrógrafo *LHRES III* del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira, para una rejilla de difracción de mediana resolución.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar experimentalmente la configuración de la rejilla de difracción de mediana resolución.
- Realizar el ajuste del lente colimador del espectrógrafo *LHRES III* a partir de las lámparas de calibración internas de neón y neón-argón.
- Identificar las líneas espectrales de las lámparas de calibración internas y las lámparas de emisión utilizadas en el laboratorio de Física III.
- Obtener la curva de calibración para el tornillo micrométrico del espectrógrafo *LHRES III* en función de la longitud de onda.
- Realizar la calibración en flujo instrumental para el espectrógrafo *LHRES III*.
- Validar la metodología desarrollada mediante la obtención y análisis de datos espectrales de objetos celestes.

1.4 Antecedentes

La primera experiencia que tienen las personas con un espectro ocurre con la observación de un arcoris, este fenómeno fue explicado en primera instancia por Theodoric de Freiberg en el año 1304 al experimentar con agua en un matráz esférico. En 1666 Sir Isaac Newton mostró que al hacer pasar un rayo solar a través de un prisma triangular, este se descomponía en toda la gama de colores. Newton fue mas allá y probó que al hacer incidir el haz de luz descompuesto a través de otro prisma invertido, se recombinaban de nuevo todos los colores obteniendo nuevamente un haz de luz blanca, esto le permitió deducir que la luz blanca no era mas que una combinación de luz de todos los colores; lastimosamente Newton no utilizó un haz de luz lo suficientemente fino para observar las líneas oscuras presentes en el espectro solar, esto hubiera significado que la espectroscopía cuantitativa podría haber comenzado un siglo y medio antes de lo que lo hizo. Después de Newton hubo una larga pausa en los avances significativos para la espectroscopía hasta el siglo XIX, aunque Thomas Melville descubrió los espectros de emisión de llamas a principios del siglo XVIII.

En el año 1800 William Herschel descubriría la parte infraroja del espectro electromagnético al demostrar que un termómetro registraba un aumento en la temperatura cuando se colocaba más allá del extremo rojo del espectro solar. De forma similar, un año después fue descubierto el ultravioleta gracias a Johann Ritter, cuando observó que la descomposición del nitrato de plata en plata, causada por la luz, se produjo incluso más rápidamente cuando dicha sustancia fue expuesta más allá del extremo violeta del espectro solar.

Las líneas oscuras omitidas por Newton fueron finalmente encontradas en 1802 por William Wollaston, pero erróneamente dedujo que estas líneas representaban las fronteras naturales entre los colores.

La espectroscopía cuantitativa comenzó realmente con Joseph Von Franhoufer en 1814; él utilizó una rendija por la cual hizo pasar un rayo de luz solar que luego dejó caer sobre un prisma. Franhoufer llegó a observar cerca de 600 líneas oscuras en el espectro del sol. En 1823 logró medir longitudes de onda y trazó 324 de las líneas solares. No fue sino hasta finales de la década de 1850, que Gustav Kirchhoff, trabajando en compañía de Robert Bunsen, se dispusieron a quemar diferentes sustancias y estudiar su espectro, descubriendo que cada elemento contenía unas secuencia de líneas definidas que lo caracterizaban. En un par de años los elementos cesio y rubidio fueron descubiertos también por Bunsen y Kirchhoff, después, descubrieron otra media docena de elementos incluyendo el hierro. En 1862 Anders Angstrom identificó hidrógeno en el Sol. Luego en 1864 William Huggins descubrió la presencia de hidrógeno, hierro, sodio y calcio en estrellas a partir del estudio de sus líneas espectrales. Huggins también logró determinar la velocidad de cuerpos celestes mediante el análisis del corrimiento de las líneas espectrales de sus posiciones normales usando el efecto Doppler. En 1868 logró determinar la velocidad de Sirius, 47 Km/s. En 1889, Antonia Maury descubrió que Mizar era una estrella binaria debido a la duplicación periódica de las líneas

en su espectro cuando una estrella se acercaba y la otra retrocedía en su movimiento orbital mutuo. Norman Lockyer postuló en 1869 un elemento desconocido gracias a la presencia de algunas líneas en el espectro solar. Este nuevo elemento fue llamado helio y no se encontró en la Tierra hasta tres décadas después.

En la década de 1880 surge el especlógrafo de prisma objetivo, cuando la fotografía astronómica se convirtió en una técnica establecida. En este instrumento no se utilizaba un colimador ni ranura, era sencillamente una configuración de prismas. La espectroscopía de prisma objetivo se inició en el Observatorio de París donde se utilizó inicialmente un prisma de vidrio de 5° con una apertura de 21 cm y se registraron los espectros de estrellas hasta magnitud 9. La espectroscopía de prisma objetivo también se emprendió en Inglaterra por Norman Lockyer y Frank McClean y en Hungría por Eugen Von Gothard. Estos especlógrafos eran rápidos y eficientes, pero sin ranuras generalmente entregaban bajo poder de resolución [10]. En 1881 Hermann Carl Vogel en Potsdam Alemania, intentó utilizar una rejilla para espectroscopía estelar sin embargo, el experimento no tuvo éxito debido a la baja intensidad lumínica del espectro. En los años de 1890 y 1891 James Keeler utilizó una rejilla de 570 líneas/mm y logró observar líneas de emisión de la Nebulosa de Orión. El trabajo de Keeler fue la primera observación exitosa de espectros mediante rejillas de difracción [10].

En la primera década del siglo XX los trabajos en espectroscopía astronómica continuaron, Walter Adams en el Observatorio del Monte Wilson en 1905 obtuvo un espectro en la región del azul para la estrella Arcturus, con un tiempo de exposición de 23 horas durante 5 noches; por su parte William Campbell y Sebastian Albrech usaron un especlógrafo de rejilla en el Observatorio de Lick en California y lograron registrar el espectro del planeta Marte. John S. Plaskett del Observatorio Dominion en Ottawa puede considerarse el pionero en la espectrometría estelar mediante rejilla de difracción; Plaskett comparó espectrogramas prismáticos y de rejilla de estrellas brillantes concluyendo que la uniformidad de la dispersión y la falta de absorción ultravioleta de la rejilla condujeron a espectros uniformemente expuestos desde la línea H beta a 385 nm.

El potencial de las rejillas en la parte roja e infrarroja del espectro fue lo que motivó a Paul Merril a comenzar experimentos en el Monte Wilson en 1922, éste mencionó alguna de las ventajas que suponía trabajar con este instrumento: mayor longitud del espectro en cada exposición, dispersión uniforme en el caso de cambiar la regiónpectral de estudio, el pequeño tamaño del especlógrafo y por primera vez, tiempos de exposición mas cortos que utilizando prismas. En 1924 Merril usó un especlógrafo con una rejilla de difracción de 600 líneas/mm y obtuvo 120 espectrogramas de prueba durante los siguientes dos años. Este especlógrafo de 1924 fue el prototipo del especlógrafo Cassegrain de rejilla de difracción del Observatorio del Monte Wilson de 1929, el cual fue el primer especlógrafo de rejilla moderno y exitoso en estudios de espectroscopía estelar, con el se obtuvieron espectros en placas sensibilizadas por infrarrojo hasta 870 nm y estas incluyen las primeras observaciones estelares de las tres líneas fuertes de calcio ionizado en los espectros de estrellas más frías.

En 1936 Theodore Dunham Jr. adquirió una rejilla de difracción de 590 líneas/mm la cual consistía en una capa de aluminio depositada sobre una base de vidrio pyrex y con esta obtuvo espectros con dispersión de 10.5, 4.5 y 2.9 /mm dependiendo de la cámara utilizada, además registró espectros de una estrella de magnitud 6, la estrella variable Mira, en aproximadamente 6 horas de exposición. El uso de este tipos de rejilla revolucionó la espectroscopía estelar desde ese mismo año, muchos otros observatorios adaptaron las características básicas del diseño utilizado en el Observatorio del Monte Wilson para sus espectrógrafos, Albert Hiltner lo utilizó en el telescopio McDonald de 82" en 1949; Ira Sprague Bowen hizo lo propio en el telescopio de 200" en el Monte Palomar en el año de 1952; durante la década siguiente se empleó en otros observatorios como el Haute Provence Observatory, el Observatorio Radcliffe, el Observatorio Lick y el Observatorio del Monte Stromlo. De la década de 1930 en adelante los instrumentos de rejilla aumentaron en popularidad mientras que los espectrógrafos de prisma quedaron atrás, las claras ventajas de la dispersión lineal, la intensidad casi uniforme y la facilidad de cambiar la regiónpectral inclinando la rejilla hicieron que los nuevos espectrógrafos fueran la primera opción para realizar estudios de espectroscopía astronómica [10].

En el año 1984, *Dodorico, S. & Ponz, D.* trabajaron en la calibración en longitud de onda y el campo plano para el *CCD CASPEC*, el espectrógrafo echelle cassegrain del *ESO*¹. La calibración en longitud de onda se realizó mediante la identificación de las líneas de emisión de una lámpara torio-argón. Posteriormente se obtuvieron 9 espectros de 4 estrellas estándar: *HD51250*, *HD66141*, *HD107328* y *HD136202* las cuales pertenecen a los grupos espetrales *K1*, *K2* y *F8*, como resultado se lograron obtener sus respectivas velocidades radiales. Los espectros estelares fueron obtenidos con el *CASPEC* y con un telescopio de 3.6 metros. Los datos espectroscópicos fueron reducidos con el software *MIDAS data reduction*. En este trabajo los autores destacan las dificultades en la reducción de los datos espectroscópicos en formato echelle y los problemas del campo plano de los sensores *CCD* [6].

En 1996, *A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor, G. Adrianzyk, G. Knispel, D. Kohler, D. Lacroix, J.-P. Meunier, G. Rimbaud & A. Vin* presentaron el espectrógrafo echelle del *Observatorio de Haute-Provence, ELODIE*. Este espectrógrafo fue diseñado para realizar mediciones precisas de velocidad radial. La calibración en longitud de onda de este espectrógrafo se realizó con el espectro de emisión de una lámpara de torio. Se aplicó un ajuste gaussiano a cada línea identificada para encontrar su posición y se usó un polinomio bidimensional para restringir la solución de la longitud de onda global; finalmente se calculó la diferencia entre el ajuste y la ubicación de las líneas. Las líneas con rms superior a 2.75 fueron rechazadas y se repitió este último paso hasta que no se tuvo mas rechazo. Para la verificación de esta calibración se correlacionó el espectro calibrado con una plantilla del espectro de Torio construida a partir de las líneas de catálogo [2].

Benjamin G. Jenkins de la *Universidad Estatal de Georgia* publicó en 2011 un artículo titu-

¹European Southern Observatory

lado A *Study of the LHIRES III Spectrograph on the Hard Labor Creek Observatory 20 inch Telescope*, en el cual se determinan los parámetros del espejógrafo *LHIRES III* en el telescopio óptico *RCT*² de 20" del *Observatorio Hard Labor Creek*. En este estudio se utilizaron tres rejillas de difracción: 150, 600 y 2400 líneas/mm y se construyeron las curvas de eficiencia para cada una de las rejillas. Para la calibración en longitud de onda se utilizó la lámpara de neón interna del espejógrafo en la cual se lograron obtener líneas fuertes en el rango de los 5000Å a los 7000Å por esta razón el autor señala la dificultad de desarrollar trabajos en las regiones de longitud de onda corta inferiores a los 5000Å y sugiere la utilización de otro tipo de lámparas de emisión como la de torio-argón que permitan la calibración del equipo en un campo mucho más amplio del espectro electromagnético. Los espectros obtenidos en este trabajo fueron procesados mediante el software *IRAF*³. Se realizaron observaciones espectroscópicas de la estrella *HD116658*, α *Vir*, con la rejilla de difracción de 2400 líneas/mm y se puede evidenciar un corrimiento por efecto Doppler de las líneas del triplete de Si III 4452Å, 4567Å y 4574Å [11].

En el año 2014 *Desnoux, V.* estudió un evento de emisión en H-Alpha para la BeStar *HD224544*. Los espectros fueron obtenidos en el *Observatoire de Haute-Provence*, Francia, con un telescopio de 0.2 m y un espejógrafo *LHIRES III*. La primera observación comenzó el 28 de julio de 2014 a las 16UT y finalizó el 28 de julio de 2014 a las 14:00, seguido de un espectro tomado dos noches más tarde el 30 de julio de 2014 a las 9,94UT y terminó el 31 de julio de 2014 a las 16:00. En comparación con el espectro en la base de datos *BeSS*⁴ tomada en 2013 2.024UT de 2013, el H-alfa pasó de la absorción a una línea de emisión de doble pico a un nivel de intensidad de 1.35 ± 0.05 veces por encima del continuo, lo que indicaba que se había presentado una explosión [5].

En Colombia se registran estudios espectroscópicos estelares en la *Universidad de los Andes* con el espejógrafo *ESPARTACO*⁵ diseñado en esa misma universidad. Uno de los proyectos en espectroscopía astronómica en la *Universidad de los Andes* fue dirigido por el *Msc. Benjamin Oostra* y tuvo como objetivo calcular la velocidad de rotación de *Aldebaran*, *HD29139*, se utilizó una lámpara de torio y argón para la calibración en longitud de onda del espectro. El tiempo de exposición de cada toma de la estrella fue de 15 minutos. Se escogió la región entre los 6140Å y los 6265Å ya que no contiene líneas atmosféricas. El cálculo de la velocidad heliocéntrica de la estrella tuvo como resultado 55.48 ± 0.08 Km/s. Otro de los trabajos de este tipo en Colombia fue realizado nuevamente por el *Msc. Benjamin Oostra* en compañía de *David Ramírez* y *Alda Arias* y consistió en el estudio del espectro solar usando

²*Ritchey-Chrétien Telescope, RCT* por sus siglas en inglés, es un telescopio *Cassegrain* especialmente diseñado para eliminar la coma, proporcionando así un amplio campo de visión en comparación con otras configuraciones más convencionales

³*Image Reduction and Analysis Facility*, desarrollado por el *National Optical Astronomy Observatory, NOAO*

⁴Be Star Spectra, Observatoire de Paris-Meudon

⁵*Espejógrafo de Alta Resolución para Trabajos Astronómicos en Colombia*

una rejilla de difracción de 2400 líneas/mm en el espectrógrafo *ESPARTACO*. Se hicieron capturas del espectro del sol en el infrarrojo cercano y el espectro visible, de los 3660Å hasta los 10000Å.

En el 2015 la *PhD. Beatriz Eugenia Sabogal*, de la *Universidad de los Andes, Departamento de Física* y el estudiante *Andres Camilo Ballesteros Casallas*, de la *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, presentan un trabajo en el cual se recopila el proceso de reducción espectral, bias y flat-field, para la estrella *12 Vulpécula HD187811* y *Cu Virginis HD124224*. Los espectros de *HD187811* fueron obtenidos por el profesor *Alejandro García* de la *Universidad de los Andes* en el *Observatorio San Pedro Mártir* a cargo del *Instituto de Astronomía de la UNAM* en México, mientras que los espectros de *HD124224* fueron recopilados por la *PhD. Beatriz Eugenia Sabogal* en el *Observatorio Astrofísico Guillermo Haro, OAGH* en Sonora México, a cargo del *INAOE*⁶, la finalidad de este trabajo fue determinar las diferencias espectroscópicas entre ambas estrellas, así como sus composiciones químicas [1].

En el año 2016 se implementó el Software *Lambda For LHIRES III* diseñado por la estudiante *Angelica María Guapacha* como producto del proyecto *Calibración del espectrógrafo LHIRES III del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira*, esta calibración se realizó para la rejilla de difracción estándar de 2400 líneas/mm [9]. Posteriormente en el 2018 se realiza el segundo estudio en la línea de espectroscopía titulado *Estimación de la temperatura efectiva para estrellas de tipo espectral K, a partir de espectroscopía de alta resolución* de la estudiante *Astrid Daniela Henao Ruso*, el cual desarrolla una metodología para estimar temperaturas espetrales a través de una rutina ejecutada en Matlab [19].

⁶*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en México*

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Radiación Electromagnética

La luz visible representa la región mas estrecha y definida del espectro electromagnético con longitudes de onda que van de los 4000\AA a los 7000\AA . Para los astrónomos es importante conocer y definir cada una de las regiones del espectro electromagnético (Ver figura 2.1), ya que diferentes fenómenos físicos ocurren en diferentes longitudes de onda. De igual manera existe una correlación entre la longitud de onda emitida y la temperatura del objeto emisor, de este modo se puede inferir que las regiones muy calientes del espacio se tornan demasiado brillantes en longitudes de onda corta; por su parte las nubes interestelares frías son estudiadas en longitudes de onda correspondientes a las ondas de radio. [18]

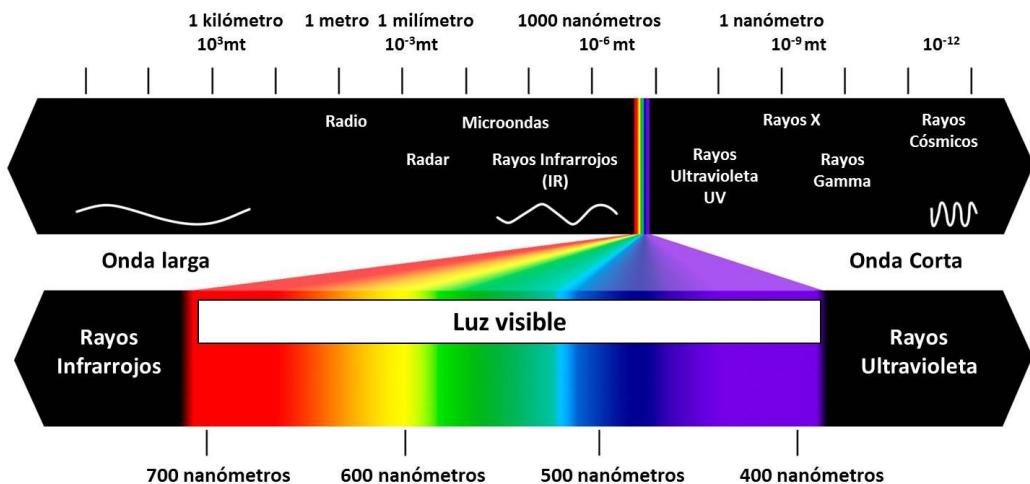


Figura 2.1: Espectro Electromagnético

2.2 Líneas espectrales

2.2.1 Transiciones atómicas

Cada uno de los átomos que componen la materia cuentan con una configuración de niveles de energía cuantizados. Una líneapectral es producida cuando un electrón en estado de excitación transita entre dos de estos niveles energéticos emitiendo un foton de una longitud de onda λ definida la cual se relaciona con la diferencia de energía entre los dos niveles mediante la ecuación de Planck (Ver ecuación 2.2), donde ν es la frecuencia, c es la velocidad de la luz y h se conoce como constante de Planck y tiene un valor de $6.626068 \times 10^{-34} J \cdot s$. [12]

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

El total de las líneas espectrales es único para cada tipo de átomo, de esta manera podemos caracterizar los objetos emisores de luz y determinar su composición química.

2.2.2 Tipos de espectros

Los espectros permiten correlacionar la intensidad de la luz percibida con su correspondiente longitud de onda. Existen tres tipos de espectros: espectro continuo, espectro de emisión y espectro de absorción.

- **Espectro continuo:** Un espectro continuo incluye todas las longitudes de onda de la luz; es decir, se puede observar la totalidad de colores tal como se muestra en la figura 2.2(a). Es producido por un objeto denso caliente, ya sea un gas denso (como el interior de una estrella), un líquido o un objeto sólido por ejemplo, un filamento de tungsteno en una bombilla incandescente.
- **Espectro emisión:** Un espectro de emisión consiste en líneas brillantes en solo algunas longitudes de onda específicas; un espectro de emisión solo puede ser producido por un gas caliente de baja densidad. La ubicación de las líneas de emisión dependen del tipo de gas. En la figura 2.2(b) podemos observar un espectro de este tipo.
- **Espectro absorción:** Un espectro de absorción es producido cuando la radiación de un cuerpo caliente pasa a través de un gas frío que absorbe la luz de la fuente antes de que llegue al observador. Los términos "caliente" y "frío" son relativos: el gas debe

ser simplemente mas frío que la fuente de emisión. Este tipo de espectros es el que obtenemos de las estrellas cuando la radiación que producen pasa atraves de la capa de gas que recubre la superficie estelar. Un espectro de este tipo se muestra en la figura 2.2(c).

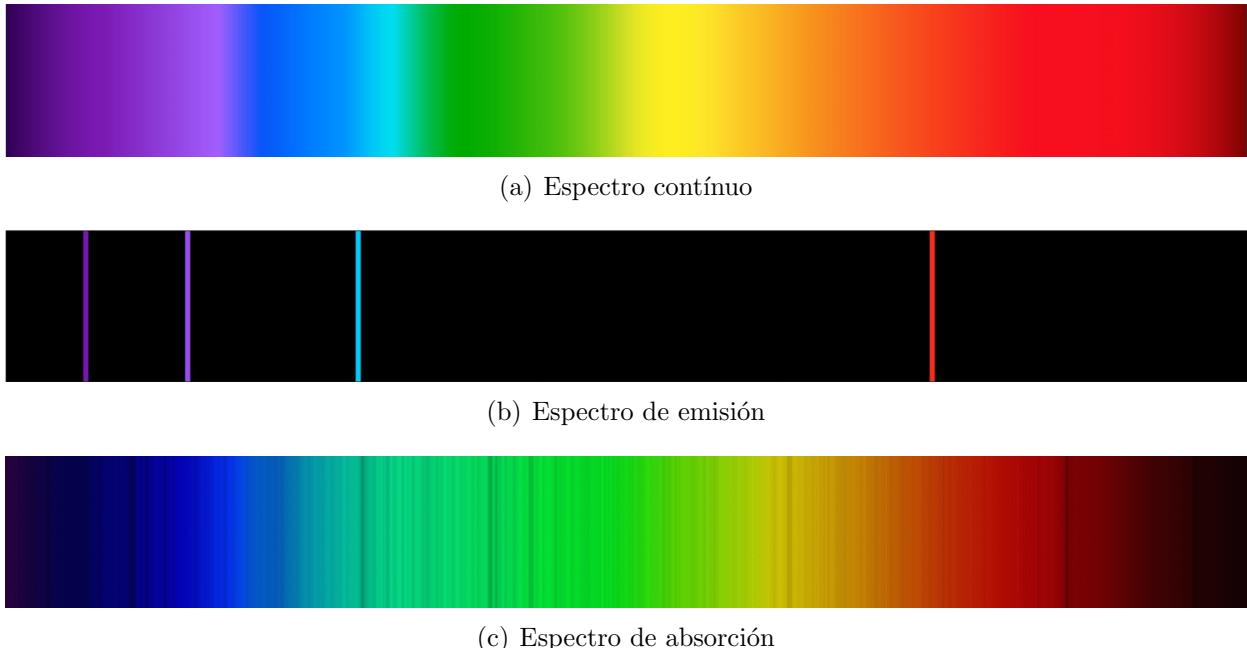


Figura 2.2: Tipos de espectros

2.2.3 Información contenida en las líneas espectrales

La forma y la estructura de las líneas espectrales entregan mucha información para determinar algunos parámetros físicos de los objetos de estudio. Una de las características de interés de las líneas espectrales es su ancho, en el caso de las líneas de absorción mencionamos en la sección anterior que estas se forman debido a la absorción de fotones cuya energía es igual a la diferencia de energías entre dos niveles atómicos, teóricamente una linea de absorción podria representarse como una función delta Dirac invertida, pero en la práctica se puede observar que las líneas tienen un ancho determinado. Existen algunos fenómenos físicos que contribuyen al ensanchamiento de las líneas espectrales:

- Ensanchamiento natural: El principio de incertidumbre de Heisenberg establece que si existe una incertidumbre Δt en el tiempo de vida media de un electrón en determinado estado de energía, entonces el sistema tiene una energía dentro de un rango ΔE , en lugar de una energía específica, esto tiene como resultado un rango de longitudes de

onda de los fotones emitidos. El ensanchamiento natural es un fenómeno físico que afecta a todas las transiciones atómicas, por este motivo no podemos extraer de este tipo de ensanchamiento alguna información acerca de la atmósfera estelar en la que la línea se forma. [8]

- Bandas moleculares: Los átomos que absorben los fotones pueden ser parte de una molécula, en esta situación el átomo presentaría niveles de energía perturbados en comparación al mismo átomo si estuviera aislado, las fotones con energías permitidas estarían en un rango más amplio esto dependiendo también del estado en que se encuentre la molécula, esto da como resultado líneas muy anchas que son denominadas bandas moleculares (Ver figura 2.3).

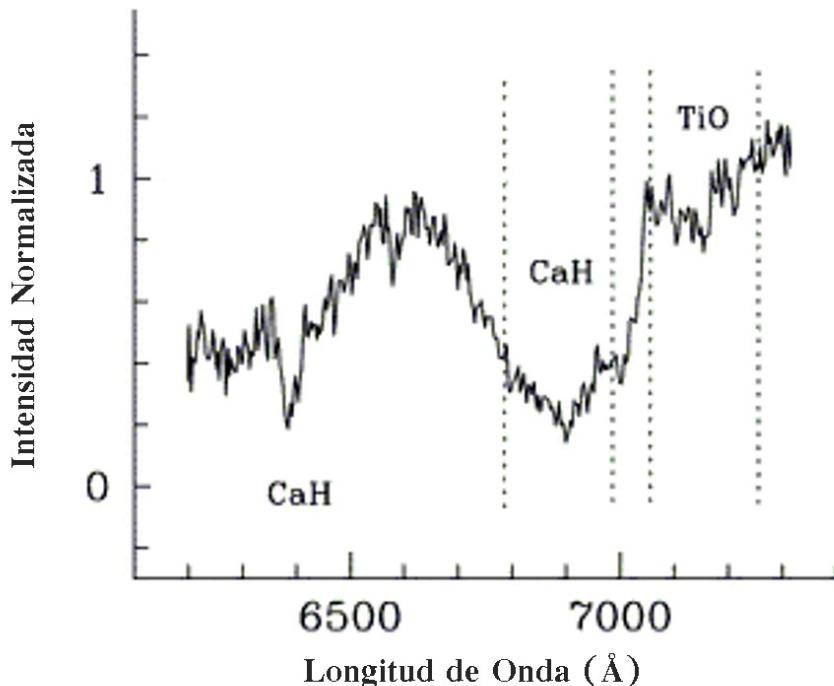


Figura 2.3: Representación de bandas moleculares espectrales de CaH y TiO

- Ensanchamiento Doppler: La atmósfera estelar está compuesta por átomos en una continua agitación térmica, esto se debe a que el gas que la conforma se encuentra a temperaturas elevadas. Los átomos que se mueven hacia la fotosfera encontrarán a los fotones emitidos por esta desplazados hacia el azul a causa del efecto Doppler, de esta manera los átomos no absorberán los fotones con la energía correspondiente a la diferencia entre sus niveles energéticos porque estos se presentan con una energía superior, dada esta situación los átomos absorberán fotones menos energéticos que dentro de su

sistema de referencia cuenten con la energía adecuada. La situación opuesta ocurre para los átomos que se alejan de la fotosfera, que dentro de su sistema de referencia encontrarán los fotones con un corrimiento hacia el rojo, de esta manera absorberán fotones más energéticos. Sumando todos estos efectos que suceden en la atmósfera estelar se tiene como resultado que no solo se absorbe la radiación con la energía exacta de los niveles atómicos en reposo, sino también fotones con energía levemente mayor o menor, esto ocasiona un ensanchamiento en la línea espectral. Como la agitación térmica está relacionada con la temperatura del gas, este tipo de ensanchamiento es un indicador de la temperatura efectiva de la estrella.

- Ensanchamiento colisional: Debido a la agitación térmica los átomos están en constante movimiento y presentan colisiones entre ellos, puede ocurrir que en el momento de una colisión se presente la absorción de un fotón, el átomo colisionado tiene una energía diferente a la del átomo en reposo siendo capaz de absorber fotones con energías diferentes. Estas colisiones son más probables en atmósferas densas, por lo tanto es un indicador de la densidad de la atmósfera estelar. Las estrellas gigantes y supergigantes tienen atmósferas muy extensas y poco densas, por su parte las estrellas de la secuencia principal tienen atmósferas mucho más densas que presentan líneas espectrales anchas debido al ensanchamiento colisional.

2.3 Clasificación espectral

2.3.1 Sistema Harvard

Este sistema clasifica las estrellas a partir de sus características espectrales y nace a partir del proyecto que lideró la astrónoma *Annie Jump Cannon* bajo la dirección del también astrónomo *Edward Charles Pickering* y que fue publicado entre 1918 y 1924 con el nombre de *Henry Draper Catalog¹* en el *Harvard College Observatory*, de ahí su nombre. El sistema se forma a partir de grupos que están nombrados utilizando las letras del alfabeto *O, B, A, F, G, K, y M*, siendo las tipo *O* las estrellas más calientes hasta las tipo *M* que son estrellas frías; a su vez cada uno de estos grupos está subdividido por magnitud de temperaturas en diez partes con los números del 0 al 9, siendo 0 las más calientes y 9 las más frías de su correspondiente grupo.

2.3.2 Sistema Morgan-Keenan

El *Sistema MK* adopta el *Sistema Harvard* pero incluye dentro de la clasificación espectral una característica de luminosidad que es denotada con números romanos, de esta manera: *I* para las estrellas supergigantes, *II* para las estrellas gigantes brillantes, *III* para las estrellas gigantes regulares, *IV* para estrellas tipo subgigantes y *V* para estrellas de la secuencia principal. De esta manera se puede clasificar espectralmente nuestro Sol como una estrella

¹Catálogo estelar con datos fotométricos y espectroscópicos de 359083 estrellas

tipo $G2-V$. En la tabla 2.1 se muestran las características de cada uno de los grupos espetrales [4].

2.3.3 Diagrama Hertzsprung-Russell

El *Diagrama Hertzsprung-Russell* sintetiza gráficamente lo mencionado en las secciones anteriores en cuanto a la clasificación espectral las estrellas. En la figura 2.4 se puede observar que el diagrama H-R esta compuesto por cuatro ejes, en los que se relacionan la temperatura, el tipo espectral, la magnitud absoluta y la luminosidad relativa. Hacia la izquierda de la gráfica se encuentran las estrellas más calientes y a la derecha las estrellas más frías; también se pueden definir cuatro grupos de estrellas dentro del diagrama: supergigantes, gigantes, secuencia principal y enanas blancas. La figura 2.4 muestra tambien el proceso de evolución estelar que comprende el nacimiento, vida y muerte de las estrellas y cada etapa de ese proceso se representa en la figura con las letras A, B, C, D, E, F y G.

2.4 Líneas de Balmer

La serie de Balmer es el nombre que recibe la serie de líneas espetrales producidas por los átomos de Hidrógeno y que son resultado de las transiciones de los niveles energéticos más altos al nivel de energía con numero cuántico principal 2. En 1885 *Johann Balmer* planteó una fórmula matemática que relacionaba las longitudes de onda de las líneas de absorción del gas Hidrógeno en el espectro visible y en el ultravioleta cercano, la fórmula de Balmer era empírica pero encajaba perfectamente con las observaciones; logró calcular las longitudes de onda de nueve líneas espetrales, cuatro en el rango visible y cinco en el ultravioleta. En 1889 *Robert Rydberg* incio la busqueda de una fórmula general que describiera este fenómeno físico y que fuera equivalente a la fórmula de Balmer obteniendo como resultado la conocida fórmula de Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (2.2)$$

Donde λ es la longitud de onda, R_H es la constante de Rydberg con valor de 10973758,306 m⁻¹, y n_1 y n_2 son números enteros correspondientes a los números cuánticos principales involucrados en la transición con $n_2 > n_1$, en la serie de Balmer n_1 es una constante de valor 2. Las líneas espetrales de la serie de Balmer se muestran en la tabla 2.2

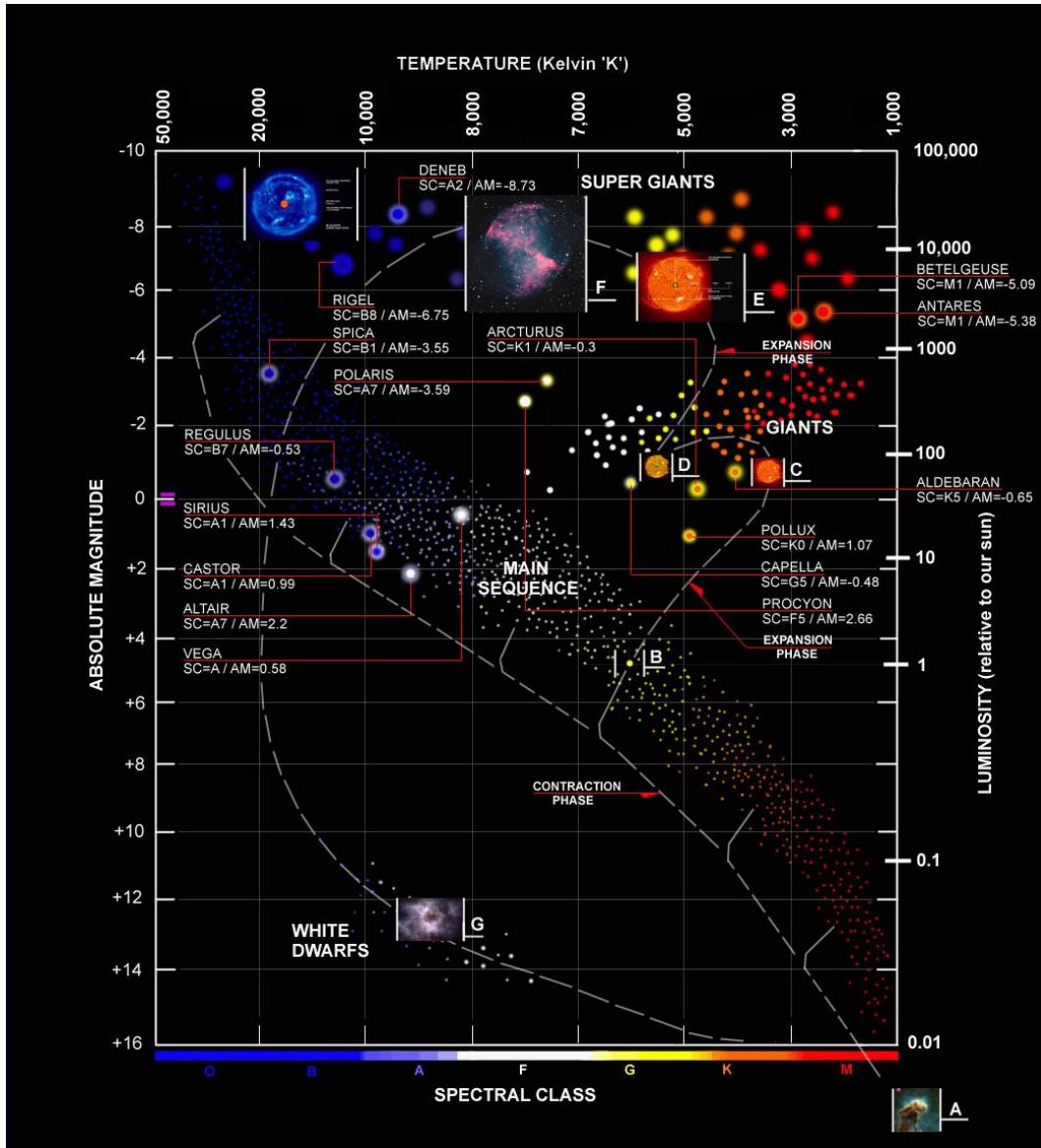


Figura 2.4: Diagrama Hertzsprung-Russell

Tipo espectral	Temperatura Superficial K	Masas Solares	Líneas espectrales características	Estrella de este tipo
O	28000 - 40000	$\geq 16 M_{\odot}$	Helio, Nitrógeno, Carbono y Oxígeno. Hidrógeno débil.	48 Orionis
B	10000 - 280000	2.1-16 M_{\odot}	Helio I, Hidrógeno moderado. En los tipos fríos serie de Balmer	Rigel
A	8000 - 10000	1.4-2.1 M_{\odot}	Hidrógeno fuerte. Helio I muy débil. Aumenta Calcio II en los tipos más fríos.	Vega
F	6000 - 8000	1.04-1.4 M_{\odot}	Calcio II fuerte. Hidrógeno mas débil. Más líneas de metales ionizados. Fe, Ti, Sr, Mg.	Canopus
G	4900 - 6000	0.8-1.04 M_{\odot}	Calcio II y Fe fuertes. Metales neutros. Hidrógeno debilitado.	Sol
K	3500 - 4900	0.45-0.8 M_{\odot}	Fuerte metales neutros. Se forman bandas moleculares de CH y CN. Hidrógeno débil.	Arturo
M	2000 - 3500	$\leq 0.45 M_{\odot}$	Fuerte metales neutros. Líneas de TiO y otras bandas moleculares. Fuerte Calcio neutro. Hidrógeno muy débil	Betelgeuse

Tabla 2.1: Características de los tipos espectrales

Transición de n	Nombre	Longitud de Onda
$3 \rightarrow 2$	H- α	6563Å
$4 \rightarrow 2$	H- β	4861Å
$5 \rightarrow 2$	H- γ	4341Å
$6 \rightarrow 2$	H- δ	4102Å
$7 \rightarrow 2$	H- ϵ	3970Å
$8 \rightarrow 2$	H- ζ	3889Å
$9 \rightarrow 2$	H- η	3835Å

Tabla 2.2: Líneas espectrales de la serie de Balmer

Capítulo 3

Metodología

3.1 Instrumentación

El Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con instrumentos y equipos necesarios para el desarrollo de la investigación científica en el campo de la astronomía. En la línea de espectroscopía en la cual se desarrolló este trabajo se usaron diferentes equipos de adquisición y procesamiento de datos para los cuales se procede a realizar una descripción técnica a continuación:

3.1.1 Telescopio

El Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira realiza sus principales proyectos observacionales con el telescopio *MEADE LX200 16" Schmidt-Cassegrain* que se muestra en la figura 3.1, este telescopio produce la imagen necesaria para desarrollar aplicaciones científicas, ya sea en imágenes planetarias, de espacio profundo o captura *CCD* en astrofotografía, astrometría, fotometría y espectroscopía. El enorme sistema de horquilla *LX200GPS* de 16", fundido en una pieza continua desde una carcasa de declinación a la otra, incluye un total de cuatro rodamientos de rodillos de 80 mm en declinación y dos rodamientos de rodillos en ascensión recta. Esta configuración de los rodamientos en el diseño del telescopio permite la adición de equipos auxiliares sustanciales sin riesgo de tensión en el mecanismo. Los engranajes helicoidales de 11" accionados por un servomotor en ambos ejes del telescopio producen el seguimiento y la rotación suaves y precisos que requiere un instrumento profesional. El telescopio integra un dispositivo GPS de alta presión que le otorga la capacidad de apuntar automáticamente a cualquiera de los 145000 objetos que están incluidos en su propia base de datos. [15].

En los telescopios *MEADE LX200 Schmidt-Cassegrain*, los rayos de luz incidente pasan a través de una lente delgada con corrección asférica¹ por ambos lados, posteriormente se dirige

¹Las lentes asféricas permiten corregir aberraciones usando menos elementos que la óptica esférica convencional.

al espejo primario esférico y luego al espejo secundario convexo; este espejo secundario multiplica la distancia focal efectiva del espejo primario y enfoca el rayo de luz en el plano focal haciendo que el haz de luz pase a través de una perforación central en el espejo primario. El esquema de este funcionamiento puede observarse en la figura 3.2.

Algunas de las características técnicas del telescopio *MEADE LX200 16" Schmidt-Cassegrain* del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira están representadas en la tabla 3.1.

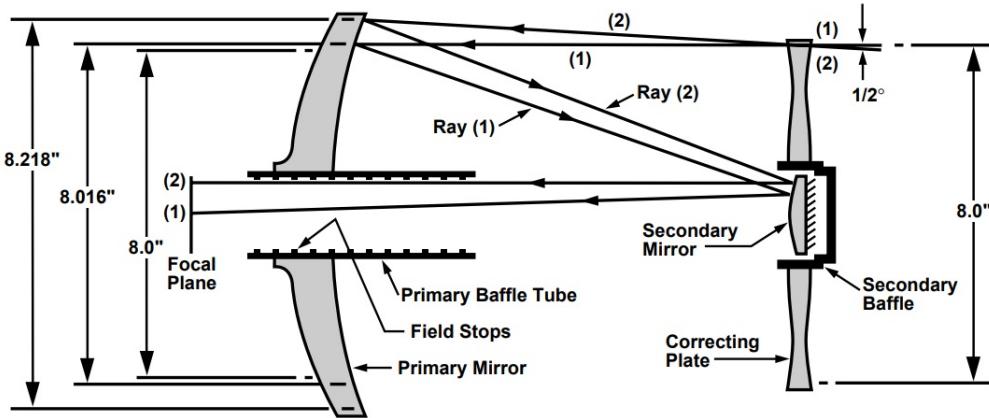


Figura 3.1: Telescopio MEADE LX200 16" Schmidt-Cassegrain

3.1.2 Espectrógrafo LHIRES III

El *LHIRES² III* es un espectrógrafo de tipo *littrow* distribuido por la marca francesa *Shelyak Instruments* (Ver figura 3.3), diseñado para realizar estudios espectroscópicos de alta res-

²Acronimo de Littrow High Resolution Spectrograph.

Figura 3.2: Sistema Óptico de los telescopios *MEADE Schmidt-Cassegrain*

Diseño óptico	Schmidt-Cassegrain
Apertura completa	406.4 mm (16")
Diametro del espejo primario	415.9 mm (16.375")
Distancia focal	4064 mm
Relación focal	f/10
Poder de resolución (arcseg)	0.28
Recubrimientos ópticos	MgF ₂ en la plato de corrección; aluminio estándar en espejos primario y secundario
Límite de magnitud visual aprox.	16.0
Límite de magnitud fotográfica aprox.	20.0
Máximo poder visual práctico	800X
Dimensiones del tubo óptico	17.5" de diámetro x 33" de largo
Velocidad de giro RA y dec.	0.01x a 1.0x sideral, variable en incrementos de 0.01x, 2x, 8x, 16x, 64x, 128x sideral; 1°/seg a 6°/seg, variable en incrementos de 0.1°

Tabla 3.1: Especificaciones Técnicas Telescopio *MEADE LX200 16" Schmidt-Cassegrain*

olución utilizando telescopios de 6" a 16". El poder de resolución, expresado como $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$, es de alrededor de 17000 en el rojo, y por lo tanto capaz de distinguir detalles espectrales menores a 0.4Å en la región del H-α [23]. El equipo integra una lámpara de calibración interna de Ne con posibilidad de adaptación de otros tipos de lámparas de emisión, el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta además con una lámpara de calibración interna de Ne-Ar. El espectrógrafo *LHRES III* está equipado con una rejilla de

difracción de alta resolución de 2400 líneas/mm pero permite adaptar rejillas de 150 y 300 líneas/mm para baja resolución; y 600 y 1200 líneas/mm para mediana resolución.

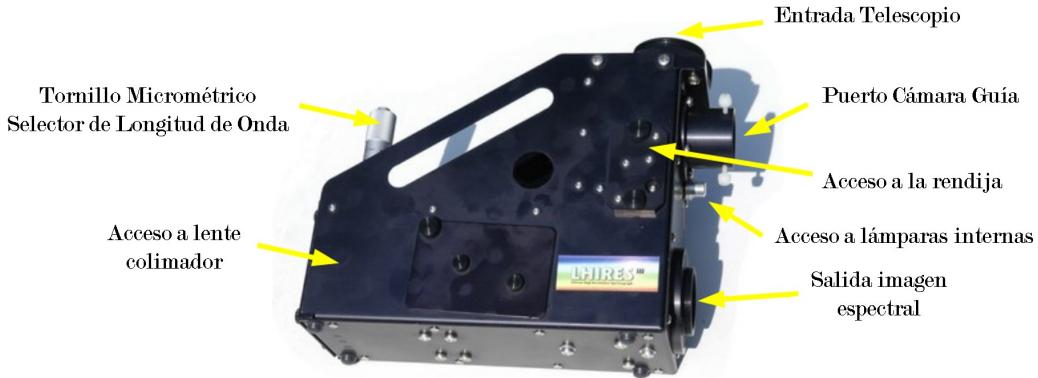


Figura 3.3: Esquema básico del espectrógrafo *LHIRES III*

Los espectrógrafos tipo *Littrow* están diseñados de forma que un mismo componente óptico, en este caso una lente de 200 mm, actúe como colimador y lente de enfoque para obtener una imagen enfocada del espectro en el detector. Este diseño elimina la necesidad de lentes separadas para la colimación y el enfoque en comparación con otros montajes de espectrógrafos como el *Czerny-Turner* o configuraciones *Ebert*. El peso de *LHIRES III* es de 1.6 kg.

En el diseño del espectrógrafo *LHIRES III* la luz ingresa desde el telescopio a la entrada principal del equipo, luego parte del haz de luz es reflejado hacia el puerto de la cámara guía, la otra parte pasa a través de la rendija con ancho nominal de 25 μm y es enviada al espejo plano dispuesto en un ángulo de inclinación de 45° que refleja el haz luminoso al lente colimador. El haz de luz colimado es dirigido a la rejilla de difracción que está montada en un soporte con un pivote que permite la rotación de la rejilla ajustando la posición del tornillo micrométrico. El haz de luz dispersado por la rejilla pasa a través de la lente y es enfocado en el detector [23]. Este tipo de diseño se puede observar con detalle en la figura 3.4.

3.1.3 Detector CCD

La cámara *SBIG* modelo *STF-8300* que se muestra en la figura 3.5 es la cámara de segunda generación de *SBIG*³ que se basa en el sensor *CCD* de fotograma completo de 8,3 megapíxeles, *KAF-8300*⁴. Este sensor *CCD* contiene 3326 x 2504 píxeles a 5.4 μm . El *CCD* tiene tecnología

³Santa Barbara Instrument Group, Inc.

⁴El sensor *KAF-8300* es un sensor de imagen *CCD* de alto rendimiento en color o monocromo de 22,5 mm en diagonal diseñado para una amplia gama de aplicaciones de detección de imágenes, incluidas las imágenes digitales.

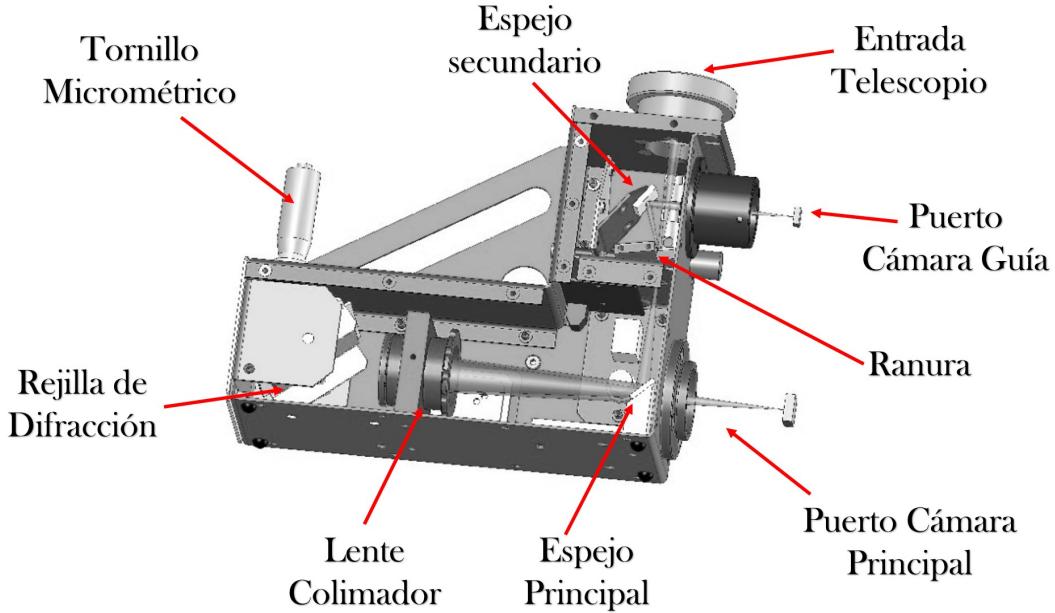


Figura 3.4: Diseño Littrow, *Espectrógrafo LHIRES III*

*antiblooming*⁵ y *microlens* para mejorar la eficiencia cuántica efectiva del sensor [20]. Esta cámara está provista de un sistema de refrigeración interno controlado por software que reduce considerablemente el ruido térmico que podría estar presente en las imágenes. La tabla 3.2 contiene las especificaciones técnicas de este instrumento.

3.1.4 Cámara guía

La cámara guía utilizada en el desarrollo de este proyecto es la *SBIG ST-i* que se muestra en la figura 3.6. La cámara recibe señales de control y alimentación a través de un puerto USB 2.0 conectado directamente al PC. Para guiar, la *SBIG ST-i* tiene en la parte posterior un puerto de salida estándar optoaislado que permite la conexión [21]. Este instrumento es de vital importancia en los estudios espectroscópicos que se realizan en el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira ya que su función es garantizar que la luz recibida de los objetos de estudio esté perfectamente alineada en la ranura del espectrógrafo durante el tiempo de adquisición de las imágenes.

⁵El sistema *antiblooming* permite que un pixel elimine el exceso de carga antes de que se sature y se desborde en los datos de la imagen.



Figura 3.5: Cámara *SBIG* modelo *STF-8300*



Figura 3.6: Cámara *SBIG* modelo *ST-i*

CCD	Kodak KAF-8300
Matriz de Píxeles	3326 x 2504 píxeles
Total de píxeles	8.3 millones
Antiblooming	1000X
Exposición	0.09s a 3600s
Refrigeración	-40°C de la temperatura ambiente
Alimentación	12V DC , 3A max
Interfaz	USB 2.0
Peso	0.8 Kg

Tabla 3.2: Especificaciones Técnicas Cámara *SBIG STF-8300*

3.1.5 Software

The Sky

The Sky es un software astronómico diseñado por la compañía *Software Bisque, Inc.* para propósitos educativos y observacionales, este permite establecer una comunicación con el telescopio *MEADE LX200* para que pueda ser controlado directamente desde el software, es posible también controlar a través de él microenfocadores y rotadores de campo. Este software permite apuntar el telescopio a los objetos de estudio de cada uno de los proyectos de investigación que se realizan desde el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira. Ver figura 3.7(a)

MaximDL

MaximDL es un software astronómico creado por *Cyanogen Imaging* que incluye un amplio conjunto de herramientas de adquisición, procesamiento y análisis de imágenes (Ver figura 3.7(b)). Permite la integración de los controles de la cámara principal, la cámara guía, ruedas de filtro, enfocadores y rotadores. Mediante este software se adquieren las imágenes necesarias para desarrollar los proyectos de astronomía observacional.

IRAF

El software *Image Reduction and Analysis Facility, IRAF* recoge un amplio conjunto de herramientas necesarias para el procesamiento y análisis de imágenes astronómicas (Ver figura 3.7(c)). Fue desarrollado por la *National Optical Astronomy Observatories (NOAO)* en Tucson, Arizona. Este sistema fue el encargado de reducir y analizar los datos entregados por el *Telescopio Espacial Hubble, HST* por sus siglas en inglés [14]. Esta diseñado bajo una arquitectura de paquetes que permiten realizar tareas específicas con grandes volúmenes de datos.

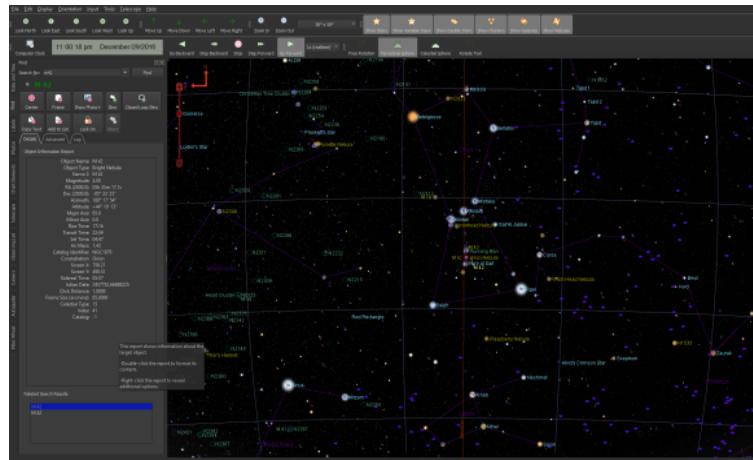
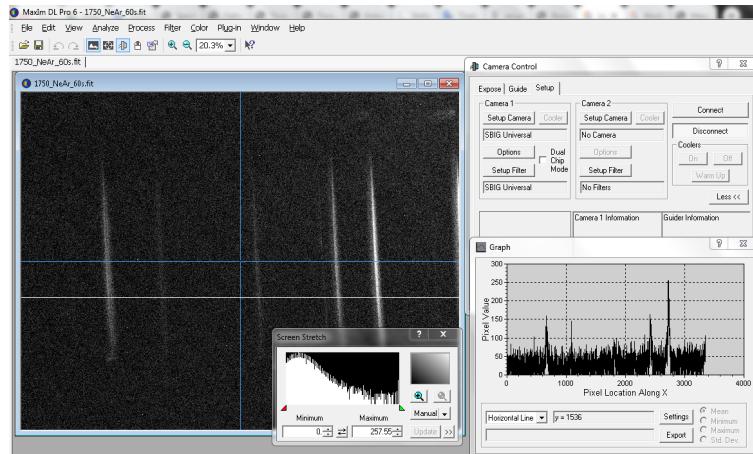
(a) Software *The Sky*(b) Software *MaximDL*(c) Entorno *IRAF*

Figura 3.7: Herramientas computacionales

3.2 Identificación de la rejilla de difracción

Una rejilla de difracción es un dispositivo óptico que consiste en una serie de líneas o surcos paralelos igualmente espaciados dispuestos en un revestimiento reflectante depositado sobre un sustrato. La distancia entre cada una de estas líneas y el ángulo que forman respecto al sustrato influyen tanto en la dispersión como en la eficiencia de la rejilla de difracción. Si la longitud de onda incidente es mucho mayor que el espacio entre sus líneas no se producirá el fenómeno de la difracción. Si la longitud de onda es mucho menor comparado con la distancia entre las líneas, la rejilla actuará como un espejo y de igual manera no se producirá ningún tipo de difracción [16]. La difracción en una rejilla se puede visualizar geométricamente en la figura 3.8, en la cual se muestra un haz de luz con una longitud de onda λ incidiendo en la rejilla de difracción con separación entre líneas d , en un ángulo θ y luego es difractado. Por convención los ángulos de incidencia y de refracción son medidos desde la normal [17].

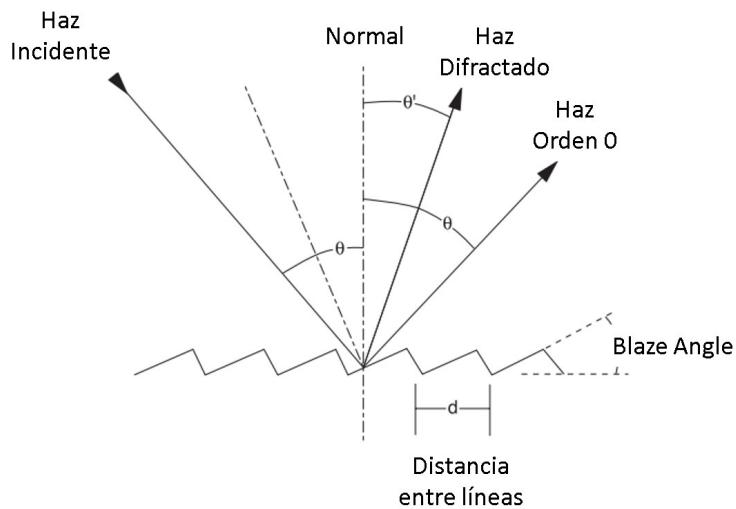


Figura 3.8: Difracción en una rejilla

La ecuación general de una rejilla de difracción esta definida de la siguiente manera:

$$m\lambda = d (\sin\theta + \sin\beta) \quad (3.1)$$

Donde m es el orden de difracción, λ es la longitud de onda de la radiación incidente, d es la distancia que separa las líneas de la rejilla de difracción, β es el ángulo de incidencia y

θ es el ángulo del haz de luz difractado.

El Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con dos rejillas de difracción para el espectrógrafo *LHRES III*, una rejilla de alta resolución de 2400 líneas/mm y una rejilla de mediana resolución para la cual se debe identificar el tipo de configuración en términos de líneas/mm.

El cálculo de este parámetro al que se le asignó la letra R se realizó mediante un experimento de difracción en el cual se usó un haz de luz monocromática con $\lambda = 523 \pm 10$ nm, una rejilla de difracción de mediana resolución como la que se muestra en la figura 3.9. La rejilla se situó a una distancia $l = 0.50$ m de una pantalla y se hizo incidir el haz de luz monocromática en dirección perpendicular a la rejilla. Posteriormente se midió la distancia x desde la normal de la rejilla hasta el punto luminoso en la pantalla que indicaba el haz de luz difractado de orden $m = 1$. Los datos obtenidos están recopilados en la tabla 3.3.

Para determinar el número de líneas/mm se utilizó la ecuación 3.1, obteniendo un valor para $R = 1200.161 \pm 173.466$ líneas/mm; conociendo que las rejillas de difracción para el espectrógrafo *LHRES III* tienen valores nominales de 150, 300, 600, 1200 y 2400 líneas/mm podemos afirmar que la rejilla objeto de estudio es una rejilla de mediana resolución con configuración de 1200 líneas/mm. Un esquema de este experimento se muestra en la figura 3.10.

x (cm)	Ángulo θ (grados)	Líneas/mm
41.5	39.7	1201
41.3	39.6	1197
41.4	39.6	1199
41.5	39.7	1201
41.7	39.8	1204

Tabla 3.3: Mediciones para cálculo del parámetro R de la rejilla de difracción

3.3 Instalación de rejilla de mediana resolución

El espectrógrafo *LHRES III* tiene por defecto instalada una rejilla de alta resolución de 2400 líneas/mm la cual debe ser extraída del equipo y en su lugar adaptar la rejilla de mediana resolución que se logró identificar como una rejilla de 1200 líneas/mm. Para realizar este procedimiento inicialmente se ubica el tornillo micrométrico en la posición inicial de manera que no se aplique ninguna fuerza en la rejilla de difracción para que esta pueda salir fácilmente y sin ningún tipo de riesgo, posteriormente se extraen los cuatro tornillos ubicados en la parte posterior del espectrógrafo, estos se muestran en la figura 3.11, los cuales mantienen unido

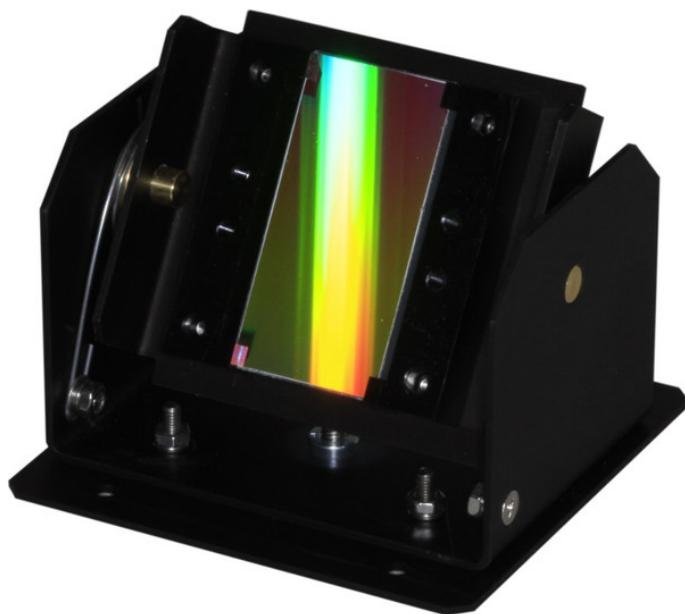


Figura 3.9: Módulo Rejilla de Difracción, espectrógrafo *LHIRES III*

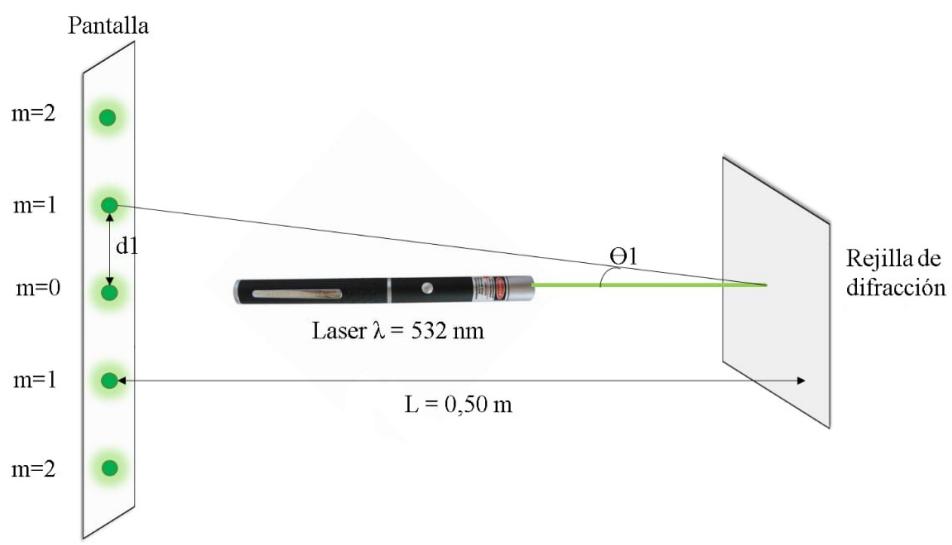


Figura 3.10: Esquema experimento difracción para rejilla de mediana resolución

el soporte de la rejilla a la carcasa del equipo. En este punto se extrae el soporte de la rejilla de difracción el cual debe ser puesto en su carcasa protectora original para impedir que la rejilla extraída se contamine con partículas de polvo o humedad del ambiente externo, en la figura 3.12 se puede observar el compartimento del espectrógrafo que almacena la rejilla de difracción. La nueva rejilla se instala siguiendo el procedimiento a la inversa, anclando el soporte a la carcasa y ajustando los cuatro tornillos que la mantienen unida al instrumento.



Figura 3.11: Primer paso extracción rejilla de difracción

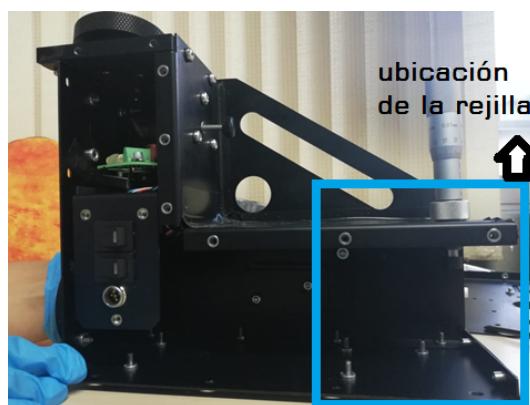


Figura 3.12: Vista interna del compartimento de la rejilla de difracción

3.4 Ajuste del lente colimador

El lente colimador del espectrógrafo *LHRES III* recoge la luz que pasa a través de la ranura y la convierte en un haz paralelo que es dirigido hacia la rejilla de difracción. El acceso al lente colimador se encuentra en la parte lateral del espectrógrafo y su ajuste se realiza de forma manual al variar la posición del anillo.

Para obtener un ajuste focal óptimo es necesario capturar con la cámara *SBIG STF-8300* y el software *MaximDL* una serie de imágenes espetrales de las líneas de emisión de la lámpara interna de Ne. A través de la herramienta *Graphic Window* de *MaximDL* podemos obtener una gráfica que relaciona los píxeles de las imágenes capturadas con su correspondiente intensidad luminosa, de esta manera analizamos las propiedades cuantitativas de cada línea de emisión realizando un ajuste de foco mucho más eficaz de lo que podría hacerlo el ojo humano. Se seleccionan una par de las líneas más brillantes del Ne sobre las cuales medimos su *FWHM*⁶ y variamos la posición del anillo hasta obtener un valor *FWHM* inferior a 10 píxeles.

En la figura 3.13(a) se muestra el espectro desenfocado en el cual es imposible distinguir la cantidad de líneas que se observan, estas líneas son anchas y difusas; para la línea que estamos midiendo en esta imagen desenfocada tenemos que el valor *FWHM* supera los 100 píxeles. Por su parte, en la figura 3.13(b) tenemos la imagen espectral enfocada, se pueden distinguir claramente las líneas de emisión y estas aparecen finas y brillantes, el *FWHM* de la línea de emisión en esta imagen es de 8 píxeles. En este punto el lente colimador está ajustado y listo para capturar espectros de objetos celestes con buena calidad.

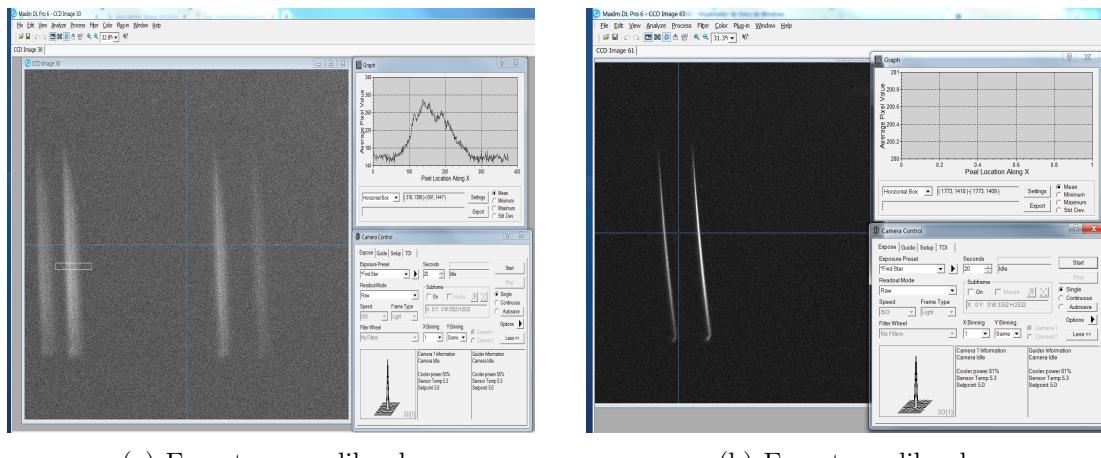


Figura 3.13: Ajuste lente colimador

⁶El *FWHM*, Full Width at Half Maximum, es la medida del ancho a media altura que presenta un determinado pico de emisión.

3.5 Adquisición de espectros de calibración

3.5.1 Tornillo micrométrico

El tornillo micrométrico del espectrógrafo *LHIRES III* permite ajustar el ángulo de倾inación de la rejilla de difracción como se muestra en la figura 3.14 con la finalidad de hacer un barrido a través de todas las longitudes de onda del espectro visible. La posición del tornillo micrométrico se relaciona directamente con la longitud de onda observada en el detector cuando la luz difractada sale del espectrógrafo. El tornillo micrométrico tiene divisiones de 0 a 25mm y tiene una presición de 0.01mm [23].

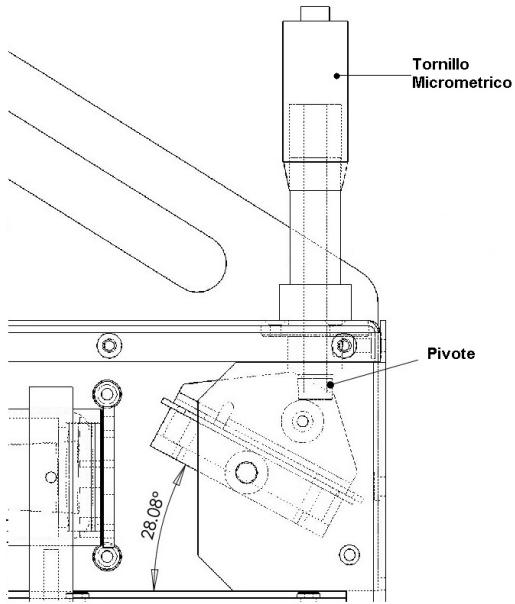


Figura 3.14: Esquema: Relación tornillo micrométrico y rejilla de difracción en el espectrógrafo *LHIRES III*. Tomado de [22]

3.5.2 Lámparas de calibración internas

Para determinar la relación que existe entre la posición del tornillo micrométrico y la longitud de onda observada para la rejilla de difracción de 1200 líneas/mm es necesario identificar la mayor cantidad posible de líneas de emisión presentes en los espectros de las lámparas de calibración disponibles. En este proyecto fueron utilizadas las lámparas internas de neón (Ne) y neón-argón (Ne-Ar) del espectrógrafo *LHIRES III*, así como las lámparas de emisión de hidrógeno (H), helio (He) y mercurio (Hg) del laboratorio de Física III de la Universidad Tecnológica de Pereira, la finalidad de utilizar estas lámparas es lograr cubrir la mayor parte del espectro electromagnético visible, desde los 4000Å hasta los 8000Å; así mismo se

decidió utilizar la lámpara de hidrógeno (H) para identificar las líneas características de la serie Balmer. La captura de las imágenes espectrales monocromáticas se realizó mediante el software *MaximDL* con la cámara *SBIG STF-8300*.

Lámpara interna Ne

Las capturas de los espectros de las lámparas de emisión fueron realizadas en pasos del tornillo micrométrico de 0.60 mm desde la posición 6.00 mm hasta la posición 13.00 mm. En las imágenes mostradas a continuación se pueden observar las capturas del espectro electromagnético visible del gas Neón, en las posiciones del tornillo para las cuales se visualizaron líneas de emisión.

La imagen 3.15 muestra el espectro de emisión de la lámpara interna de Ne en la posición del tornillo micrométrico 8.50 mm, se puede observar una línea muy brillante y 4 líneas ténues; en la figura 3.16 se pueden observar 4 líneas brillantes y 12 líneas ténues en la posición del tornillo 9.10 mm; en la imagen 3.17 se tienen 5 líneas brillantes una de ellas notoriamente dominante y 5 líneas mas ténues en la posición del tornillo micrométrico 9.70 mm; para la posición del tornillo 10.30 mm se nota claramente una línea fuerte dominante y 6 líneas bastante débiles, ver figura 3.18; en la imagen 3.19 se visualizan claramente 11 líneas de emisión, 3 de las cuales se muestran bastante fuertes, en esta imagen el tornillo micrométrico está configurado en la posición 10.90 mm; para la posición del tornillo equivalente a 11.50 mm como se ve en la figura 3.20 se tiene una línea brillante y un grupo de 7 líneas de emisión mucho más débiles; la figura 3.21 nos muestra todas las imágenes capturadas para el neón combinadas, de esta manera se observa la totalidad del espectro electromagnético visible emitido por el gas Ne.

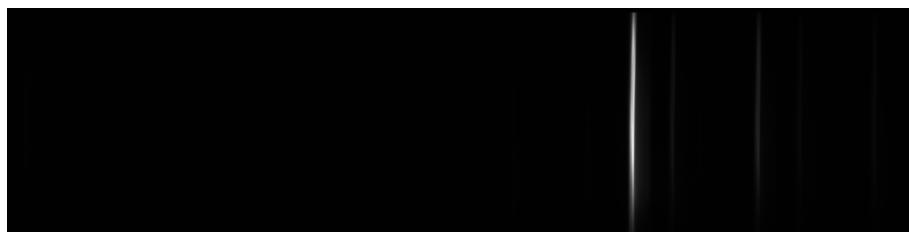


Figura 3.15: Espectro de emisión del gas Ne centrado en la posición 08.50 mm del tornillo micrométrico

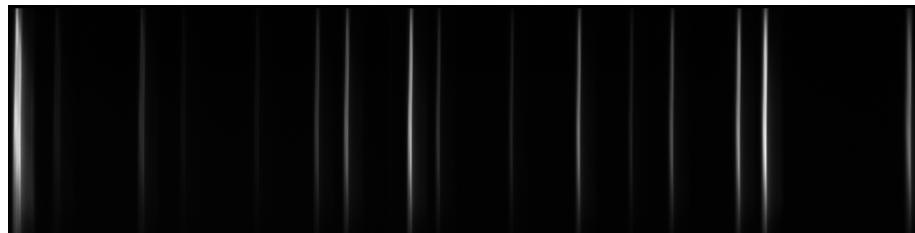


Figura 3.16: Espectro de emisión del gas Ne centrado en la posición 09.10 mm del tornillo micrométrico

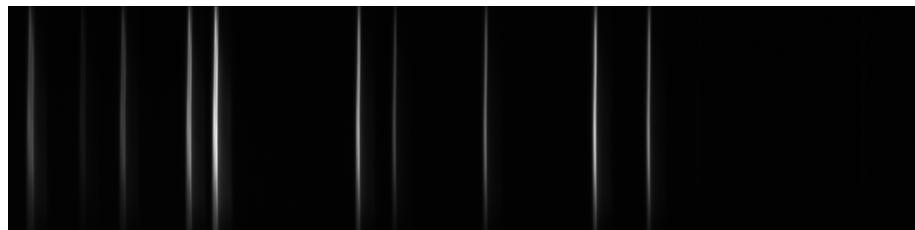


Figura 3.17: Espectro de emisión del gas Ne centrado en la posición 09.70 mm del tornillo micrométrico

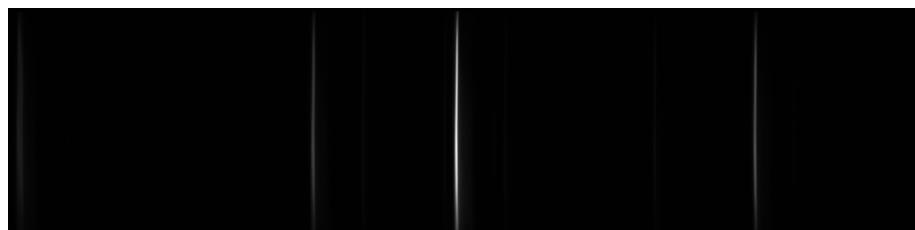


Figura 3.18: Espectro de emisión del gas Ne centrado en la posición 10.30 mm del tornillo micrométrico

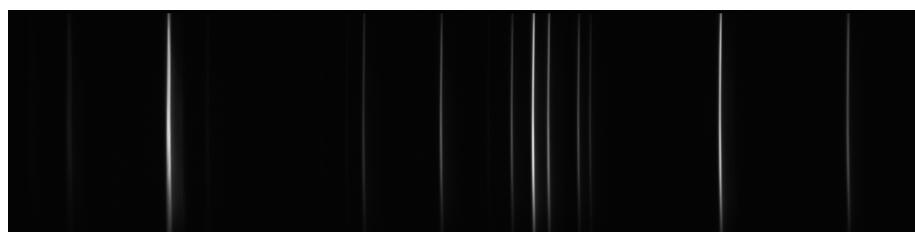


Figura 3.19: Espectro de emisión del gas Ne centrado en la posición 10.90 mm del tornillo micrométrico

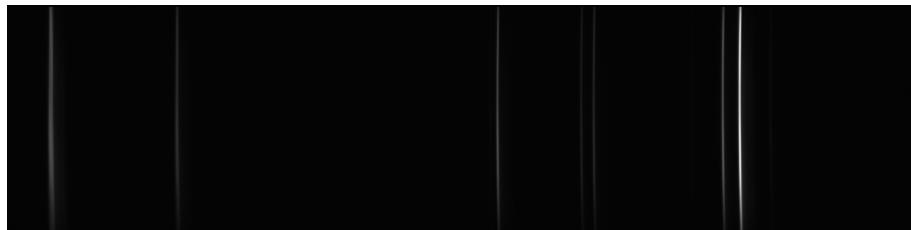


Figura 3.20: Espectro de emisión del gas Ne centrado en la posición 11.50 mm del tornillo micrométrico

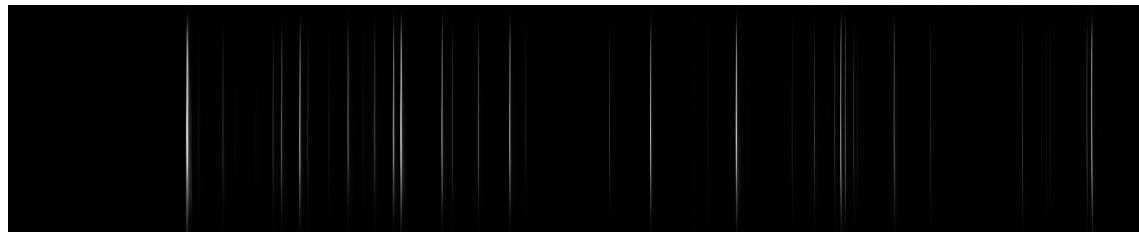


Figura 3.21: Espectro de emisión completo del gas Ne en el rango visible

Cambio de lámpara de calibración

El Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta adicionalmente con una lámpara de calibración interna de Ne-Ar para el espejógrafo *LHRES III*. Para utilizar esta lámpara es necesario desmontar la lámpara de Ne incluida por defecto en el espejógrafo y adaptar la nueva lámpara en el módulo de calibración. La lámpara de Ne-Ar permite tener mas líneas hacia el azul en comparación con la lámpara de Ne, esto es de mucha importancia si se desean calibrar imágenes espectroscópicas en las longitudes de onda más cortas del rango visible.

Para adaptar la lámpara es necesario desmontar el módulo de calibración del espejógrafo *LHRES III*, el primer paso es retirar los tornillos que mantienen unida la carcasa en la parte lateral en la que se encuentran los interruptores de encendido de las lámparas internas, estos se muestran en la figura 3.22.

Posteriormente se retiran los dos tornillos que se encuentran al lado de la ranura como se muestra en la figura 3.23, se debe sostener el módulo de calibración como se ve en la figura 3.24(a) teniendo cuidado que no se golpee con alguno de los elementos ópticos circundantes; se extrae el módulo de calibración girándolo levemente como se muestra en la figura 3.24(b) y posteriormente se desliza fuera de la carcasa tal como se muestra en la figura 3.24(c), en este punto se debe tener mucho cuidado de no tocar o golpear el espejo principal.



Figura 3.22: Extracción carcasa lateral



Figura 3.23: Tornillos módulo de calibración

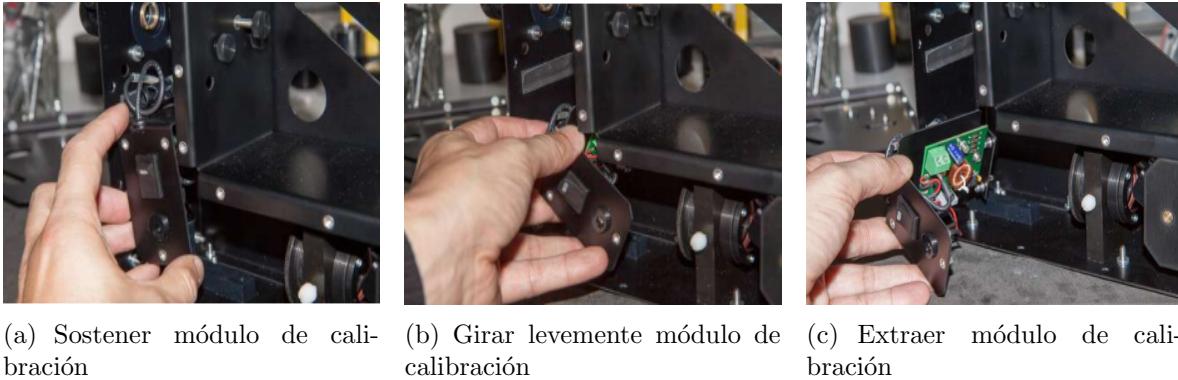


Figura 3.24: Extracción del módulo de calibración

El módulo de calibración está compuesto por una placa electrónica y es alimentado con una fuente de 12V. La placa electrónica presenta un movimiento al activar el interruptor de encendido de la lámpara, de modo que esta quede perfectamente alineada en el camino óptico del espectrógrafo; cuando se apaga, el módulo regresa la lámpara a su lugar y deja libre el camino óptico para que la luz igrese desde el exterior por la entrada principal [24]. El módulo de calibración se muestra en detalle en la imagen 3.25.

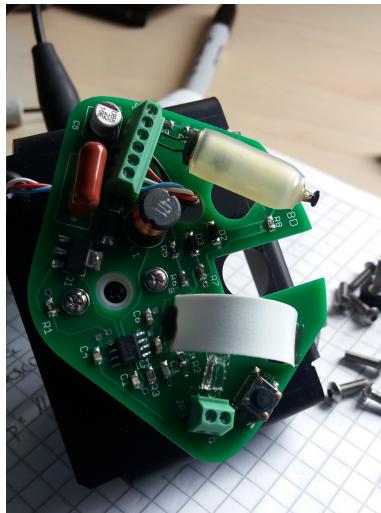


Figura 3.25: Módulo de calibración espectrógrafo LHIRES III

El siguiente paso es retirar del módulo la lámpara de Ne y conectar la lámpara de Ne-Ar teniendo cuidado con la polarización de la misma, antes de adaptar nuevamente el módulo al

espectrógrafo se recomienda revisar el funcionamiento de la nueva lámpara, verificando que efectivamente emita radiación y que el módulo presente el movimiento adecuado al momento de encenderlo. Si la instalación de la lámpara de Ne-Ar es correcta se procede a introducir el módulo en la carcasa del espectrógrafo siguiendo el procedimiento anterior a la inversa; se ajustan los tornillos del módulo y de la tapa lateral de la carcasa.

Lámpara interna Ne-Ar

Siguiendo el procedimiento con la lámpara interna de Ne descrito en la sección 3.5.2.1 se obtienen las capturas spectrales de la lámpara de emisión de Ne-Ar. Las imágenes spectrales de esta lámpara se muestran a continuación:

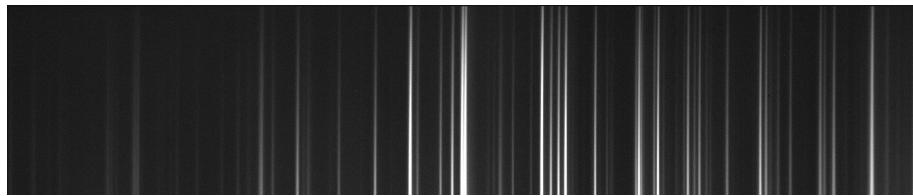


Figura 3.26: Espectro de emisión del gas Ne-Ar centrado en la posición 06.60 mm del tornillo micrométrico

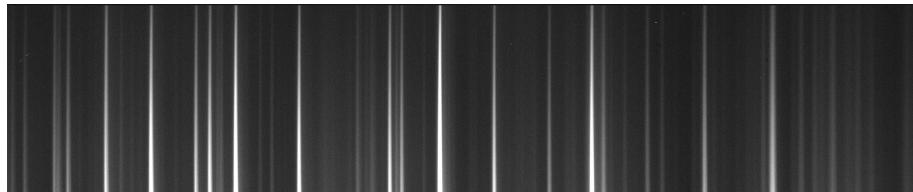


Figura 3.27: Espectro de emisión del gas Ne-Ar centrado en la posición 07.40 mm del tornillo micrométrico



Figura 3.28: Espectro de emisión del gas Ne-Ar centrado en la posición 08.70 mm del tornillo micrométrico

3.5.3 Lámparas de calibración de laboratorio

El Departamento de Física de la Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con lámparas de emisión de diferentes gases las cuales son utilizadas en las prácticas experimentales que se realizan en el laboratorio de Física III. En el desarrollo de este trabajo y con el fin de identificar la mayor cantidad de líneas espectrales se utilizaron las lámparas de emisión de H, He y Hg de este laboratorio. El montaje instrumental para realizar las capturas espectrales de las lámparas anteriormente mencionadas se muestra en la figura 3.29.

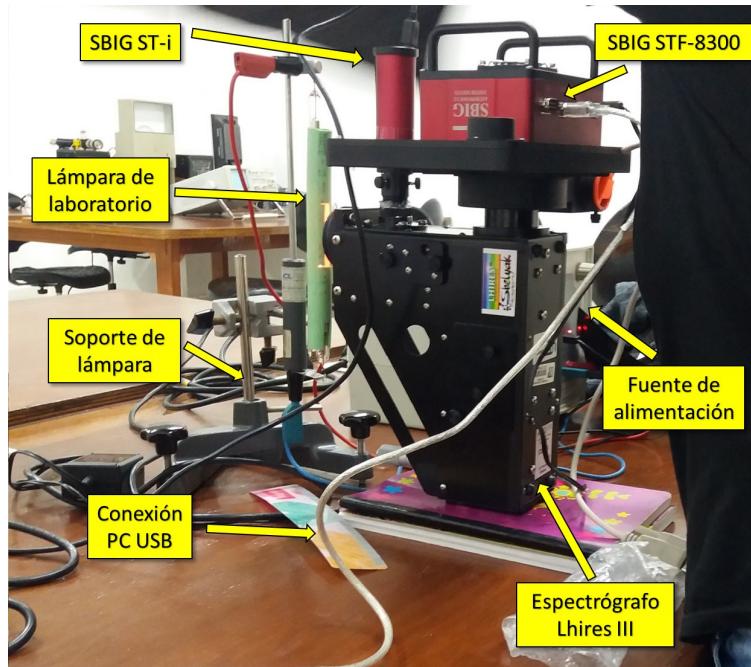
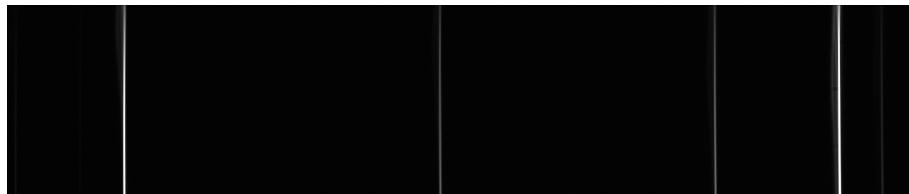


Figura 3.29: Montaje Instrumental para capturas de espectros de lámparas de emisión del laboratorio de Física III de la Universidad Tecnológica de Pereira

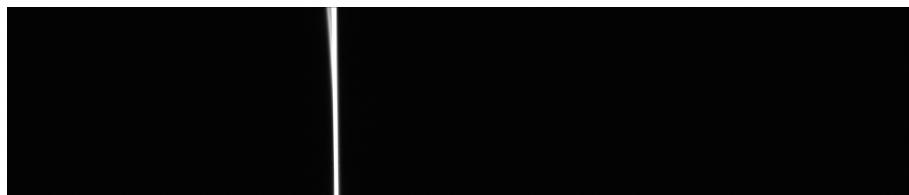
En la figura 3.30 se observan espectros de emisión de la lámpara de He correspondientes a las posiciones 7.20 mm, 8.80 mm y 10.40 mm del tornillo micrométrico. Por su parte en la figura 3.31 se observan las líneas espectrales obtenidas para la lámpara de emisión de Hg. En la figura 3.32 se pueden observar las líneas de emisión del H; En la imagen 3.32(c) se puede observar claramente la línea H- α de la serie de Balmer.

3.6 Identificación de líneas espectrales

Para identificar las líneas de emisión obtenidas a partir de los espectros de las lámparas de calibración inicialmente se construyeron perfiles espectrales en *Matlab* que relacionan la longitud de onda con la intensidad basados en la información extraída de la base de datos de



(a) Espectro de emisión del gas He centrado en la posición 07.20 mm del tornillo micrométrico



(b) Espectro de emisión del gas He centrado en la posición 08.80 mm del tornillo micrométrico

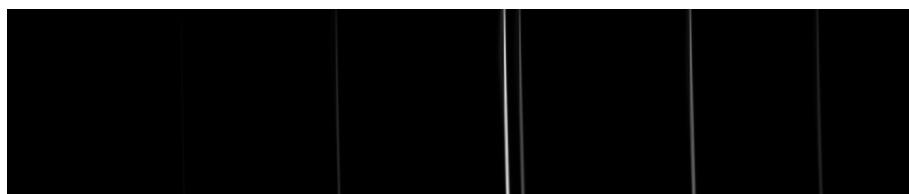


(c) Espectro de emisión del gas He centrado en la posición 10.40 mm del tornillo micrométrico

Figura 3.30: Espectros de emisión de la lámpara de Helio



(a) Espectro de emisión del gas Hg centrado en la posición 10.40 mm del tornillo micrométrico



(b) Espectro de emisión del gas Hg centrado en la posición 10.80 mm del tornillo micrométrico

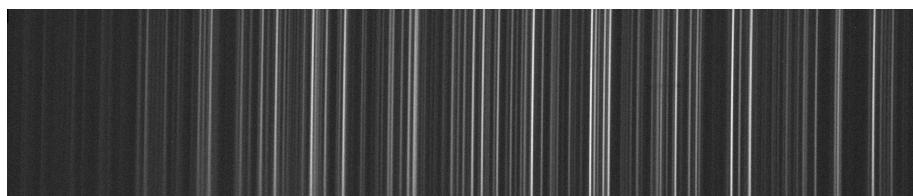


(c) Espectro de emisión del gas Hg centrado en la posición 11.20 mm del tornillo micrométrico

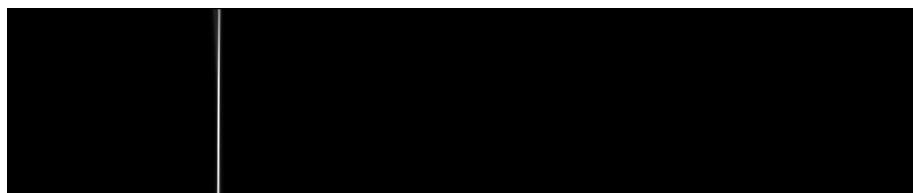
Figura 3.31: Espectros de emisión de la lámpara de Mercurio



(a) Espectro de emisión del gas H centrado en la posición 07.20 mm del tornillo micrométrico



(b) Espectro de emisión del gas H centrado en la posición 08.80 mm del tornillo micrométrico



(c) Espectro de emisión del gas H centrado en la posición 09.65 mm del tornillo micrométrico

Figura 3.32: Espectros de emisión de la lámpara de Hidrógeno

espectros atómicos del *National Institute of Standards and Technology, NIST* [13]. (Ver figura 3.33). Posteriormente mediante el software *MaximDL* se exportaron las tablas de datos que relacionan número de píxel vs intensidad de cada una de las imágenes espectrales obtenidas a partir de las lámparas de calibración, estos datos fueron procesados en *Matlab* construyendo histogramas de cada una de las capturas, los cuales fueron comparados de manera directa con los perfiles espectrales construidos con los datos del *NIST* tal como se muestra en la figura 3.34, de esta manera se le asignó el valor de la longitud de onda correspondiente a cada línea de emisión de los espectros tomados en el laboratorio. Con esta metodología se lograron identificar 84 líneas de emisión, incluyendo las líneas H- α y H- β de la serie de Balmer para el Hidrógeno.

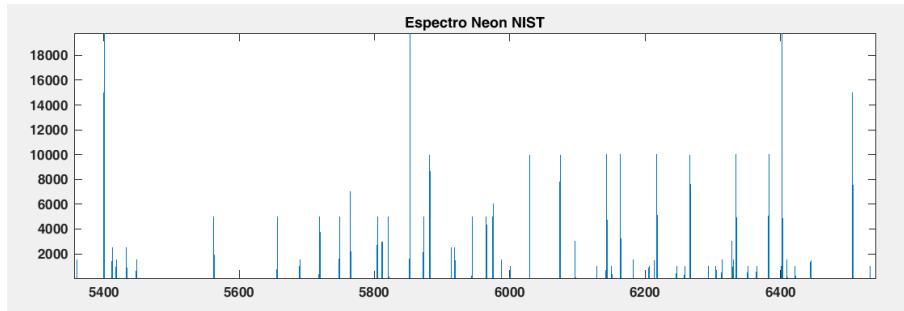


Figura 3.33: Perfil espectral *Matlab* con base de datos del *NIST*

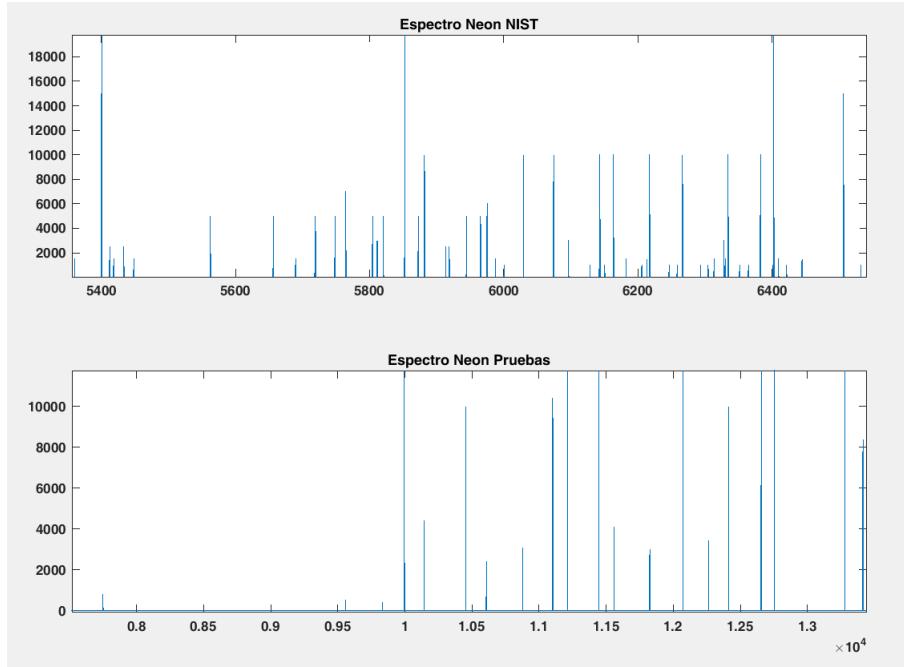


Figura 3.34: Comparación líneas espectrales experimentales vs base de datos del *NIST*

3.7 Montaje Instrumental

Las imágenes espectrales de los objetos astronómicos fueron tomadas desde el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira con el telescopio *MEADE LX200*, el espectrógrafo *LHRES III*, la cámara de guiado *SBIG ST-i* y la cámara *CCD SBIG STF 8300*. Antes de iniciar el proceso de adquisición de datos es necesario ajustar el enfoque de la cámara guía que es de gran importancia en la toma de espectros de cuerpos celestes, ya que esta garantiza que la luz recolectada por el telescopio sea dirigida directamente a la ranura del espectrógrafo.

Como paso inicial en el proceso de acople de los instrumentos requeridos se conecta el espectrógrafo a la cámara *SBIG STF-8300*, posteriormente se acopla la cámara *SBIG ST-i* al espectrógrafo por medio del puerto de cámara guía, este montaje parcial se adapta al telescopio *MEADE LX200* teniendo en cuenta que la posición de los equipos quede como sigue: La cámara guía apuntando hacia el sur, al norte el tornillo micrométrico, los puertos de conexión eléctrica y cables de datos de la cámara *CCD* queden dirigidos hacia abajo tal como se muestra en la figura 3.35.

Con todo el montaje dispuesto en la cúpula del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira, se procede a apuntar el telescopio a un campo donde se puedan capturar imágenes de objetos con bordes definidos como edificios o árboles distantes, mediante el software *MaximDL* en el panel de control de la cámara guía se toman las imágenes en secuencia mientras se ajusta manualmente el foco de la cámara guía hasta obtener una imagen limpia y definida. En la figura 3.36 se observa una captura de la cámara guía en la cual se distinguen objetos con bordes rectos y líneas definidas de vegetación. Se recomienda ajustar el foco de la cámara guía con la luz del día de modo que se puedan identificar fácilmente los objetos de prueba.

3.8 Captura y reducción de espectros

Como método de validación de la metodología para la calibración del tornillo micrométrico se seleccionaron tres estrellas cuyas principales características se pueden visualizar en la tabla 3.4; las regiones espetrales seleccionadas se encuentran en rangos del espectro electromagnético visible en el cual se encuentran líneas de interés científico.

3.8.1 Preprocesamiento

El preprocesamiento es el procedimiento que permite eliminar los diferentes tipos de ruido o señales parásitas presentes en las imágenes espetrales, estos efectos pueden ser aditivos o multiplicativos.

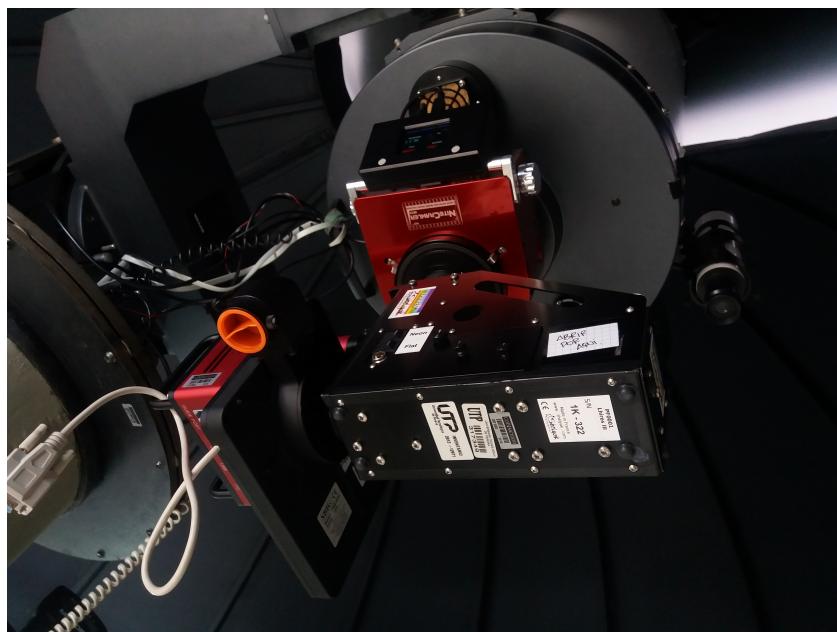
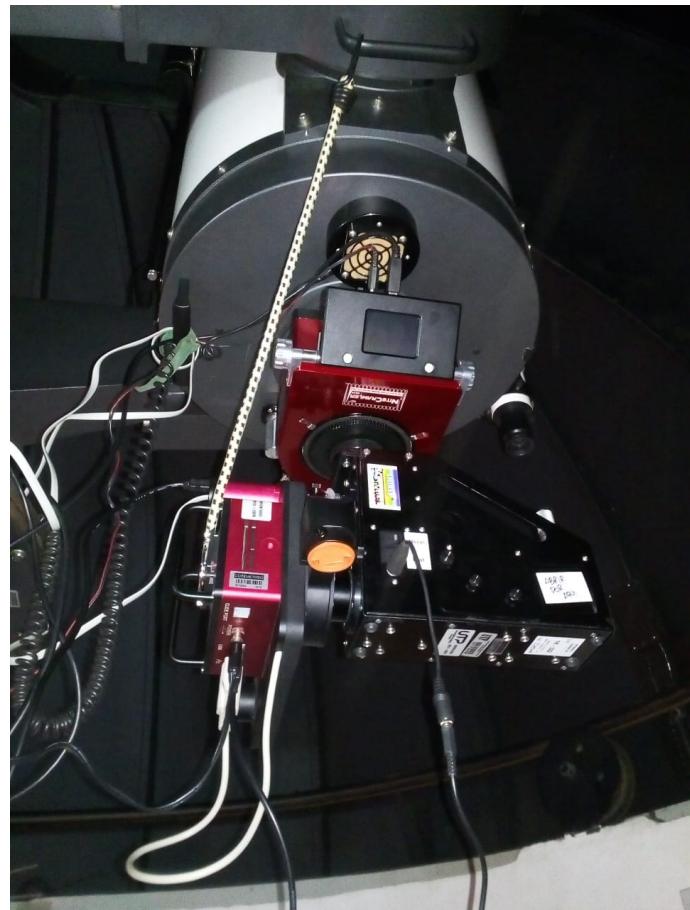


Figura 3.35: Montaje instrumental para adquisición de espectros astronómicos

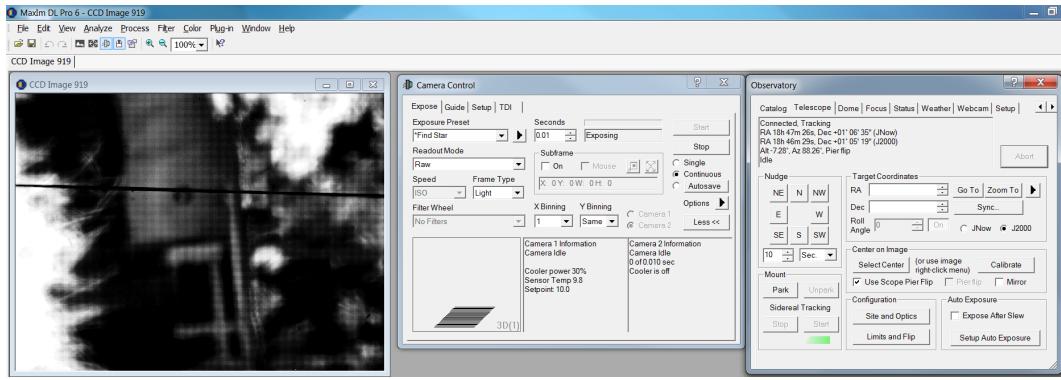


Figura 3.36: Procedimiento de ajuste del foco de la cámara guía

Nombre	HD	Coord. J2000 AR/Dec	Mag	Tipo espectral
eps Peg	HD206778	21 44 11.16 / +09 52 30.03	2.39	K2 Ib
gam Psc	HD219615	23 17 09.94 / +03 16 56.24	3.70	G9 III
eta Ser	HD168723	18 21 18.60 / -02 53 55.78	3.25	K0 III

Tabla 3.4: Estrellas seleccionadas para validación

Bias

El ruido *Bias* o de offset es de tipo aditivo y se describe como el efecto generado por la corriente de polarización caracterizado por un nivel mínimo de cuentas introducido en las imágenes por los circuitos electrónicos durante el proceso de captura para evitar que el ruido de lectura produzca cuentas negativas en las regiones de baja intensidad. Para corregirlo se toman imágenes con el obturador cerrado y con el tiempo de exposición mínimo permitido por la cámara, estas imágenes se combinan para luego ser restadas de las imágenes espectroscópicas.

Darks

Es el efecto de la corriente oscura percibida como lecturas falsas de intensidad debido a las agitaciones térmicas de los electrones, que hace que cierto número de ellos lleguen a los electrodos de la placa sin haber sido excitados por la llegada de un fotón procedente de la estrella [3]. Este efecto es corregido automáticamente en el momento de la captura tomando las imágenes con la opción *Auto-Darks* activada.

Flat-Field

Este efecto es inherente al sensor *CCD* ya que en el proceso de fabricación no es posible lograr homogeneidad en la sensibilidad de los fotodetectores, esto se traduce en regiones de las imágenes más brillantes que otras aún estando sometidas a la misma intensidad lumínica. Para corregir este ruido se toma una imagen de un campo plano uniformemente iluminado, en este estudio se tomaron imágenes a la lámpara interna de flats del espectrógrafo *LHRES III*. Estas imágenes se combinan y se normalizan en una imagen final denominada *master flat*; este ruido es de tipo multiplicativo, por tal razón cada imagen de ciencia es dividida finalmente por la imagen *master flat* para garantizar la uniformidad.

Rayos cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas de alta energía procedentes del espacio exterior que constantemente penetran hasta la superficie terrestre y son captados por el sensor *CCD* presentándose en las imágenes como puntos calientes de muy alta intensidad. Este efecto es sustraído de las imágenes mediante el software *IRAF* utilizando la tarea *cosmicrays* del paquete *noao*, subpaquete *imred*, subsubpaquete *crutil*. Esta tarea detecta automáticamente los píxeles calientes y cada uno de ellos se reemplaza por el promedio de intensidad de los cuatro píxeles vecinos.

3.8.2 Calibración en Longitud de Onda

El procesamiento de las imágenes espectrales se realizó con el software *IRAF* especializado en reducción y análisis de imágenes astronómicas. Con las imágenes libres de ruido se dispone a encontrar el perfil espectral 1D, para esto inicialmente se procede a encontrar la apertura mediante la tarea *apall* que se encuentra alojada en el paquete *noao*, subpaquete *twodspec*, subsubpaquete *apextract*; esta tarea nos ayuda a encontrar el ajuste matemático a la curva de los datos espectrales de la imagen, se debe encontrar el mejor ajuste entre los que ofrece esta tarea: *legendre*, *chebyshev*, *linear spline* y *cubic spline*. La imagen resultante es un perfil 1D del espectro no calibrado, en el eje horizontal se representa el número de pixel y el eje vertical el número de cuentas.

El paso siguiente es identificar las líneas de emisión conocidas en el espectro de la lámpara usando la tarea *identify* del paquete *noao*, subpaquete *onedspec*; esta tarea nos permite centrar el cursor en cada una de las líneas identificadas y marcarlas con su correspondiente valor de longitud de onda, finalmente se elige la función que mejor se ajuste a los datos de dispersión. Este perfil calibrado ahora se referencia con la imagen espectral del objeto de estudio utilizando la tarea *dispcor*, de esta manera el eje horizontal del perfil 1D del objeto queda calibrado en longitud de onda.

3.8.3 Calibración en Flujo

Para realizar la calibración en flujo es necesario inicialmente capturar y calibrar en longitud de onda el espectro de una estrella patrón o estándar, el software *IRAF* incluye por defecto

los valores tabularizados del flujo para estas estrellas estándar las cuales permiten calcular la función sensorial que determina finalmente la respuesta en función de la longitud de onda y esta es posteriormente aplicada a los espectros de las estrellas de validación. Para realizar la calibración en flujo, el software *IRAF* requiere los datos de los tiempos de exposición de las imágenes, las coordenadas del lugar de observación, así como las coordenadas del objeto, estos datos están presentes en el header de cada imagen. Si las imágenes fueron tomadas desde alguno de los observatorios astronómicos incluidos en la base de datos de *IRAF*, la cual se puede visualizar mediante el comando *observatory list* (Ver Anexo C), se debe especificar el nombre del observatorio en el keyword OBSERVAT. Este proceso permite obtener la respuesta del sensor *CCD* obteniendo como resultado un espectro observado desde fuera de la atmósfera con la configuración telescopio-espectrógrafo-detector utilizados en la toma de los datos [29]. Uno de los parámetros necesarios para la calibración en flujo son las tablas de extinción atmosférica, *IRAF* almacena en sus bases de datos algunas de estas curvas de extinción para lugares de observación específicos, cuando se realizan trabajos que no requieren alta precisión en los datos de flujo instrumental se puede usar alguna de las tablas que contiene *IRAF* por defecto. En la imagen 3.37 se puede observar que la diferencia entre las curvas de extinción son mínimas incluso en lugares como Kitt Peak en Arizona y Cerro Tololo en Chile [25].

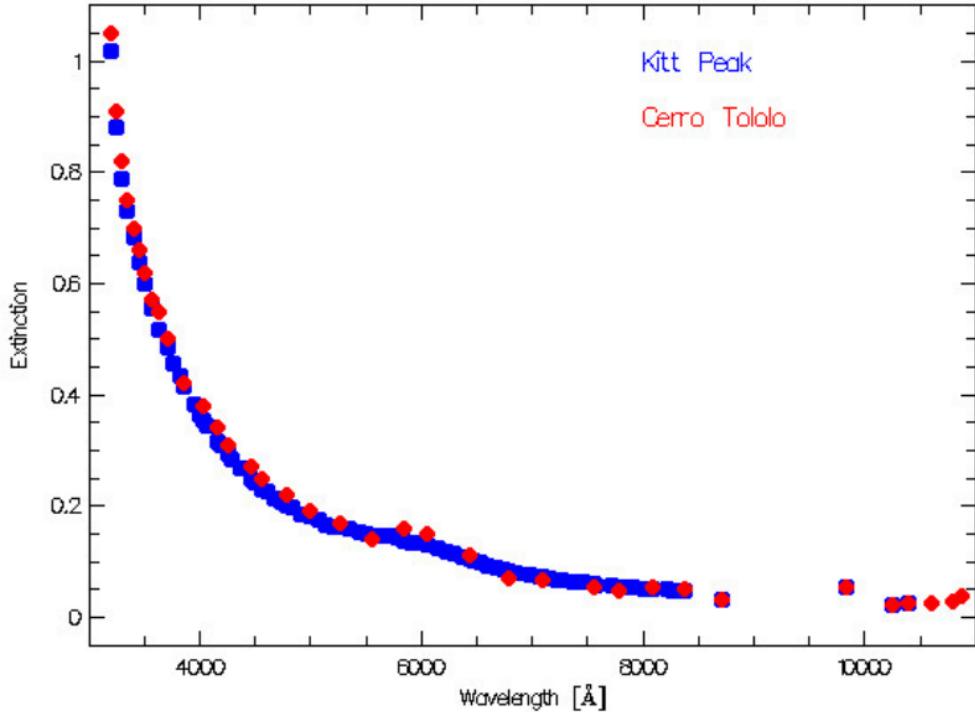


Figura 3.37: Curva de extinción atmosférica Kitt Peak vs Cerro Tololo. Gráfica tomada de [25]

El primer paso en la calibración de flujo es determinar el directorio en el que se encuentran los datos tabularizados de flujo para la estrella estándar o estrella de calibración para ello se utiliza la tarea *standard*, la cual solicita la ruta en la que se almacenan las tablas de datos para cada estrella específica. En este trabajo se utilizaron dos estrellas de calibración: *HD214923* y *HD198001*.

Después de que la tarea standar registra la respuesta de cada estrella patrón es necesario encontrar la dependencia entre la longitud de onda, la sensibilidad instrumental y la transparencia de la atmósfera, para esto se utiliza la tarea *sensfunc* la cual debemos alimentar con el archivo *standard*, el espectro de la estrella patrón calibrado en longitud de onda y los datos de la masa de aire de cada imagen de calibración. Esta tarea entrega finalmente la función de sensibilidad necesaria para aplicar a las imágenes de las estrellas de validación.

Como paso final se procede a relacionar la función sensorial con el espectro de las estrellas de validación, para este fin se utiliza la tarea *calibrate* la cual debemos alimentar con los espectros de validación calibrados en longitud de onda y la masa de aire determinada en el header de cada uno de ellos; esta tarea entrega como resultado un espectro calibrado en flujo instrumental.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Curva de calibración

Para determinar la relación entre la longitud de onda observada y la posición del tornillo micrométrico del espectrógrafo *LHRES III* con la rejilla de difracción de mediana resolución de 1200 líneas/mm se tomaron imágenes con la cámara *SBIG STF-83000* de cada una de las líneas espectrales identificadas y se ajustó la posición del tornillo micrométrico hasta el punto en el que el pico espectral de la línea de emisión se ubicara en el centro del campo (píxeles 1676 y 1677 con la ayuda de las herramientas *Crosshairs* y *Graphic Window* tal como se muestra en la figura 4.1, en la cual se puede ver centrada en el campo la línea de emisión del Ne con longitud de onda de 5401Å en la posición del tornillo micrométrico 8.11 mm. El total de las 84 líneas espectrales identificadas se presenta en la tabla 4.1.

A partir de los datos obtenidos experimentalmente se construyó la curva de calibración que describe la relación entre la longitud de onda observada y la posición del tornillo micrométrico del espectrógrafo *LHRES III*, específicamente para la rejilla de difracción de mediana resolución de 1200 líneas/mm. La curva de calibración que se presenta como resultado en la figura 4.2 esta descrita por el polinomio de segundo grado que se muestra en la ecuación 4.1 los datos fueron ajustados en *Matlab* mediante el método de mínimos cuadrados. El cálculo de la incertidumbre, que varía dependiendo de la posición del tornillo micrométrico a lo largo de las diferentes longitudes de onda, se realizó mediante matriz de covarianzas.

$$P(x) = 1.37 \times 10^{-8}x^2 + 0.0011729x + 1.3737 \pm inc \quad (4.1)$$

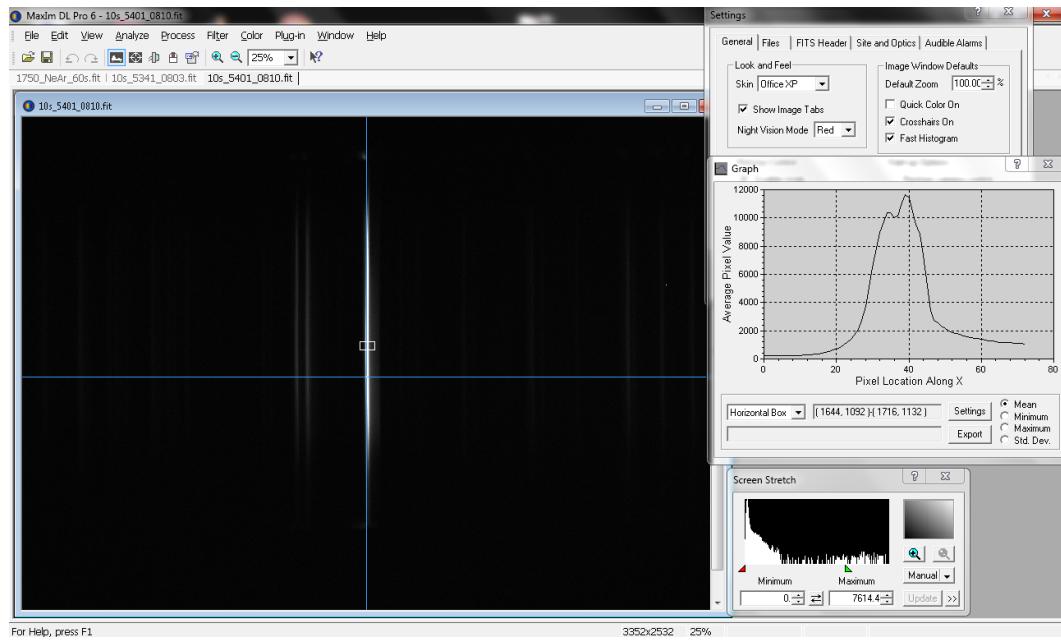


Figura 4.1: Línea de emisión del Ne centrada en el campo con $\lambda = 5401\text{\AA}$ y posición del tornillo micrométrico 8.11 mm

Tipo de elemento	Longitud de Onda (Å)	Posición medida (mm)	Posición estimada (mm)	Inc (mm)	Error (%)
He	3888.65	6.11	6.14	± 0.07	0.49
He	3964.73	6.23	6.24	± 0.06	0.16
He	4023.97	6.28	6.32	± 0.06	0.63
Hg	4046.56	6.30	6.34	± 0.06	0.63
Ar	4072.00	6.44	6.38	± 0.06	0.94
Hg	4077.84	6.33	6.38	± 0.06	0.78
Hg	4120.44	6.41	6.44	± 0.06	0.47
He	4120.81	6.41	6.44	± 0.06	0.47
He	4143.76	6.43	6.47	± 0.05	0.62
Ar	4158.59	6.55	6.49	± 0.05	0.92
Ar	4200.67	6.60	6.54	± 0.05	0.92
Hg	4337.10	6.66	6.72	± 0.05	0.89
H	4340.47	6.69	6.72	± 0.05	0.45
Hg	4347.49	6.67	6.73	± 0.05	0.89
Hg	4358.33	6.72	6.74	± 0.05	0.30
He	4387.93	6.76	6.78	± 0.04	0.29
He	4437.55	6.80	6.85	± 0.04	0.73

Continua en la siguiente página

Tipo de elemento	Longitud de Onda (Å)	Posición medida (mm)	Posición estimada (mm)	Inc (mm)	Error (%)
He	4471.48	6.84	6.89	± 0.04	0.73
Ar	4481.81	6.96	6.90	± 0.04	0.87
Hg	4491.55	6.90	6.92	± 0.04	0.29
Ar	4545.05	7.03	6.99	± 0.04	0.57
Ar	4579.35	7.08	7.03	± 0.04	0.71
Ar	4589.35	7.13	7.04	± 0.04	1.28
Ar	4609.57	7.15	7.07	± 0.04	1.13
He	4713.15	7.20	7.20	± 0.04	0.00
Ar	4726.87	7.31	7.22	± 0.04	1.25
Ar	4847.81	7.48	7.38	± 0.04	1.35
Ar	4879.86	7.54	7.42	± 0.04	1.62
He	5015.68	7.59	7.60	± 0.04	0.13
He	5047.74	7.62	7.64	± 0.04	0.26
Ne	5116.50	7.75	7.73	± 0.04	0.26
Hg	5222.92	7.80	7.87	± 0.04	0.89
Ne	5330.78	8.03	8.01	± 0.04	0.25
Ne	5341.09	8.05	8.03	± 0.04	0.25
Ne	5400.56	8.11	8.11	± 0.04	0.00
Hg	5698.59	8.48	8.50	± 0.04	0.24
Ne	5764.42	8.60	8.59	± 0.04	0.12
He	5875.62	8.66	8.74	± 0.04	0.92
Ne	5881.89	8.76	8.74	± 0.04	0.23
Ne	5944.83	8.81	8.83	± 0.04	0.23
Ne	5975.53	8.88	8.87	± 0.04	0.11
Ne	6029.10	8.94	8.94	± 0.04	0.00
Ne	6074.34	8.99	9.00	± 0.04	0.11
Ne	6096.16	9.04	9.03	± 0.04	0.11
Ne	6143.06	9.09	9.10	± 0.04	0.11
Ne	6163.59	9.11	9.12	± 0.04	0.11
Ar	6172.28	9.18	9.13	± 0.04	0.55
Ne	6217.28	9.21	9.20	± 0.04	0.11
Ne	6266.49	9.26	9.26	± 0.04	0.00
Ne	6304.79	9.29	9.31	± 0.04	0.21
Ne	6334.43	9.32	9.35	± 0.04	0.32
Ne	6382.99	9.41	9.42	± 0.04	0.11
Ne	6402.25	9.43	9.44	± 0.04	0.11
H	6562.79	9.61	9.66	± 0.04	0.52
He	6678.15	9.73	9.82	± 0.04	0.92
Ne	6678.28	9.78	9.82	± 0.04	0.41

Continua en la siguiente página

Tipo de elemento	Longitud de Onda (Å)	Posición medida (mm)	Posición estimada (mm)	Inc (mm)	Error (%)
Hg	6716.34	9.91	9.87	± 0.04	0.41
Ne	6929.47	10.12	10.16	± 0.04	0.39
Ar	6965.43	10.25	10.21	± 0.04	0.39
Ne	7032.41	10.27	10.30	± 0.04	0.29
Ar	7067.22	10.38	10.35	± 0.04	0.29
Hg	7091.86	10.47	10.39	± 0.04	0.77
Ar	7147.04	10.48	10.46	± 0.04	0.19
He	7281.35	10.55	10.65	± 0.04	0.94
Hg	7346.51	10.70	10.73	± 0.04	0.28
Ar	7383.98	10.80	10.79	± 0.04	0.09
Hg	7395.62	10.82	10.80	± 0.04	0.18
Hg	7411.85	10.84	10.83	± 0.04	0.09
Ne	7488.87	10.90	10.93	± 0.04	0.27
Ar	7503.87	10.97	10.95	± 0.04	0.18
Ar	7514.65	10.98	10.97	± 0.04	0.09
Hg	7620.76	11.16	11.11	± 0.04	0.45
Ar	7723.76	11.28	11.26	± 0.04	0.18
Ar	7948.18	11.58	11.57	± 0.05	0.09
Ar	8006.16	11.64	11.65	± 0.05	0.09
Ar	8014.79	11.66	11.67	± 0.05	0.09
Ar	8103.69	11.79	11.79	± 0.06	0.00
Ar	8115.31	11.80	11.81	± 0.06	0.08
Ar	8264.52	12.04	12.01	± 0.07	0.25
Ar	8408.21	12.25	12.22	± 0.07	0.25
Ar	8424.65	12.27	12.24	± 0.07	0.25
Ar	8521.44	12.40	12.38	± 0.08	0.16
Ar	8667.94	12.60	12.59	± 0.09	0.08
Ne	8865.76	12.80	12.87	± 0.11	0.54

Tabla 4.1: Lineas de emisión identificadas y su correspondiente posición del tornillo micrométrico

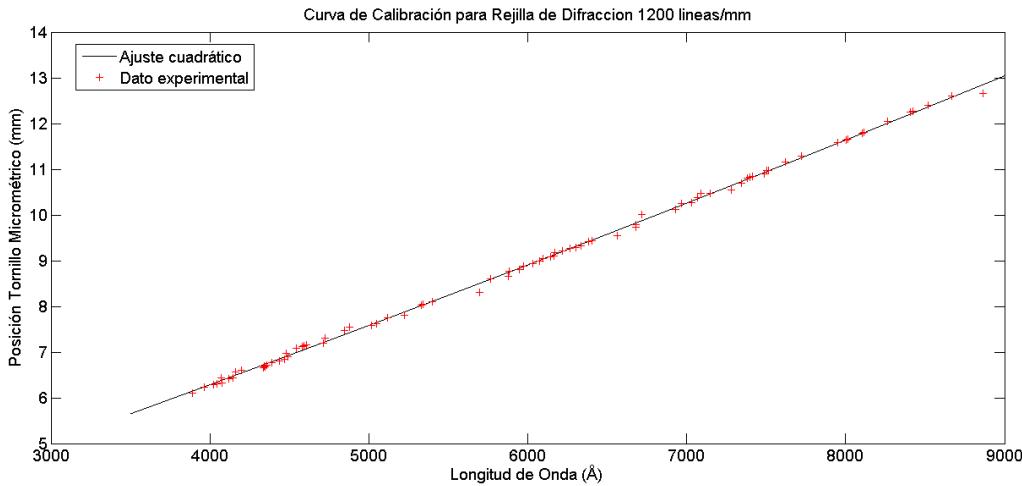


Figura 4.2: Curva de calibración tornillo micrométrico vs Longitud de onda para rejilla de difracción de 1200 líneas/mm

4.2 Actualización Software *Lambda For LHIRES III*

El Software *Lambda For LHIRES III* mencionado en la sección 1.4 estaba inicialmente diseñado para determinar la relación entre la longitud de onda estudiada y la posición del tornillo micrométrico para una rejilla de difracción de 2400 líneas/mm; en el presente trabajo se integró un nuevo entorno que permite seleccionar el tipo de rejilla utilizada ya sea la rejilla de 2400 líneas/mm o la nueva rejilla de 1200 líneas/mm y calcular la relación entre la longitud de onda que se desea estudiar y la posición en la cual debe configurarse el tornillo micrométrico para tal fin; en la actualización de este software también se adapta un entorno gráfico intuitivo que permite al investigador realizar estudios correspondientes a la estimación de temperaturas estelares, el código fuente del cálculo de temperaturas fue presentado en el trabajo de grado de la estudiante *Astrid Daniela Henao Russo* en el 2018. Esto permite que los futuros trabajos en espectroscopía desde el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira puedan realizarse en alta o mediana resolución dependiendo de las necesidades del proyecto, utilizando un único entorno computacional que se presenta como una herramienta indispensable para realizar estudios con el espectrógrafo *LHIRES III*. Esta actualización también ofrece la posibilidad de adaptar un entorno gráfico para la automatización de este equipo, abriendo una puerta para un futuro proyecto de investigación; estas nuevas características se recogen en el software *Lambda For LHIRES III V2 .0* el cual es producto del presente trabajo. El diseño y entorno de *Lambda For LHIRES III V2 .0* se muestra en las imágenes A.1, A.2, A.3, A.4, A.5. El esquema general del software se observa en la figura A.6

4.3 Validación de la metodología

Para validar la metodología desarrollada en la calibración del espectrógrafo *LHRES III* para la rejilla de difracción de 1200 líneas/mm se tomaron espectros en regiones con líneas de interés científico de tres estrellas: *HD168723*, estrella de tipo espectral *K0III* de magnitud 3.25; *HD206778*, estrella de tipo espectral *K2I* de magnitud 2.39; y *HD219615* estrella de tipo espectral *G9III* y magnitud 3.70. Estos espectros fueron procesados con el software *IRAF* y calibrados en flujo instrumental y longitud de onda. Los espectros procesados fueron exportados de *IRAF* en formato ASCII mediante la tarea *wspectext* del paquete *noao*, subpaquete *onedspec* y fueron graficados en *Matlab* junto con el espectro correspondiente obtenido de la base de espectros estelares *MILES* del *Instituto de Astrofísica de Canarias* para ser comparados. En ellos se lograron identificar líneas de absorción características de los elementos que componen las atmósferas de estas estrellas así como las bandas moleculares correspondientes a los elementos que componen la atmósfera terrestre. Los datos que respaldan estos resultados se presentan en la tabla 4.2 y se pueden visualizar gráficamente en las siguientes imágenes:

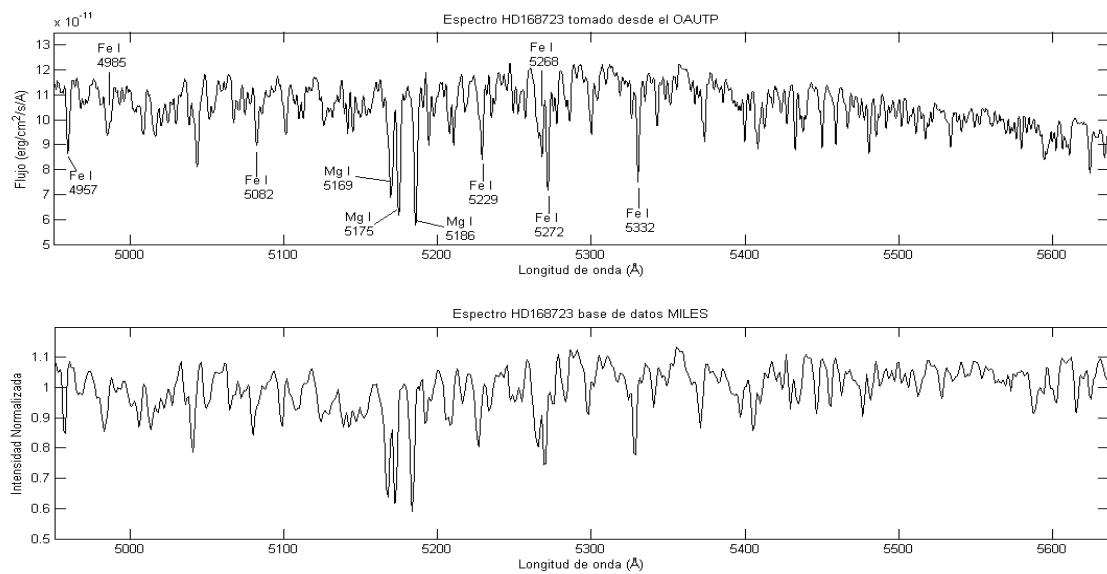


Figura 4.3: Espectro de la estrella *HD168723* (*Eta Serpentis*) en el rango 4951 \AA - 5639 \AA . Se identificaron líneas de Fe I y el característico triplete de magnesio

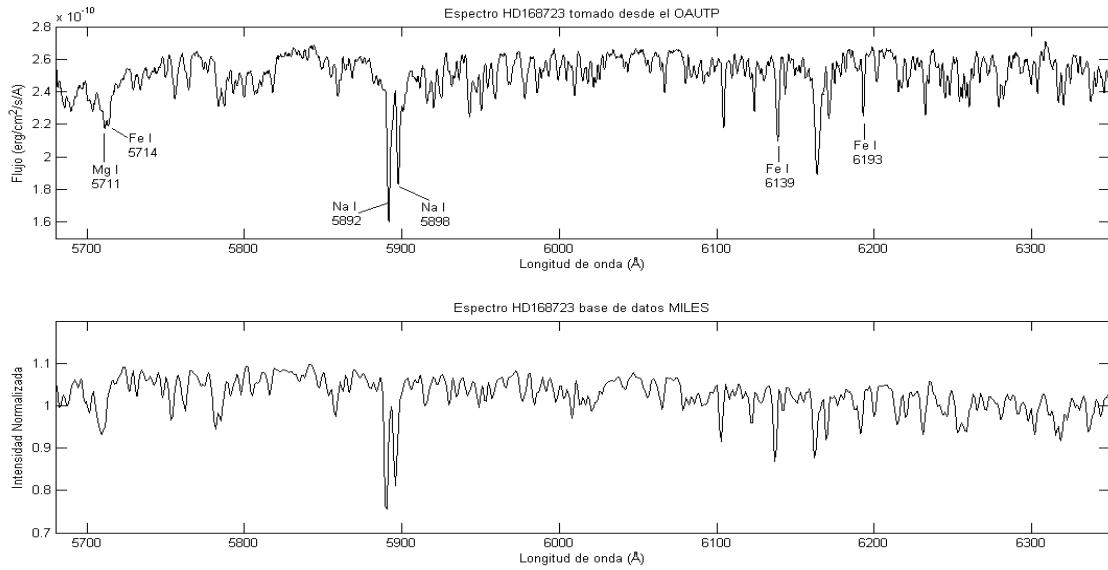


Figura 4.4: Espectro de la estrella *HD168723* (Eta Serpentis) en el rango 5680Å - 6350Å.
Se identificaron líneas de Fe I, Mg I y el característico doblete de sodio

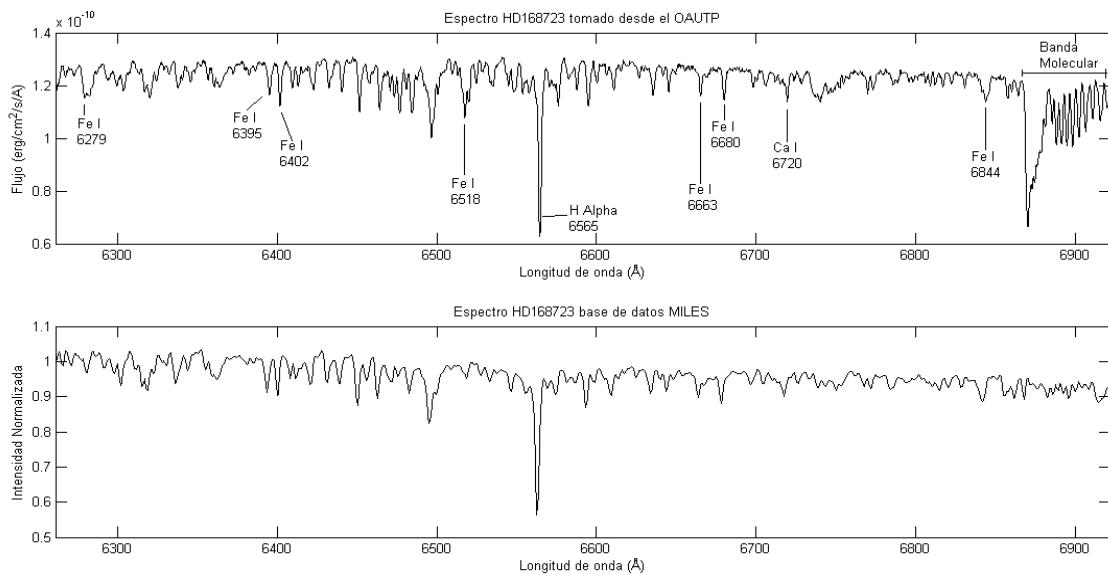


Figura 4.5: Espectro de la estrella *HD168723* (Eta Serpentis) en el rango 6261Å - 6922Å.
Se identificaron líneas de Fe I, Ca I, la línea H alpha de la serie de Balmer y la banda molecular correspondiente al O2 de la atmósfera terrestre

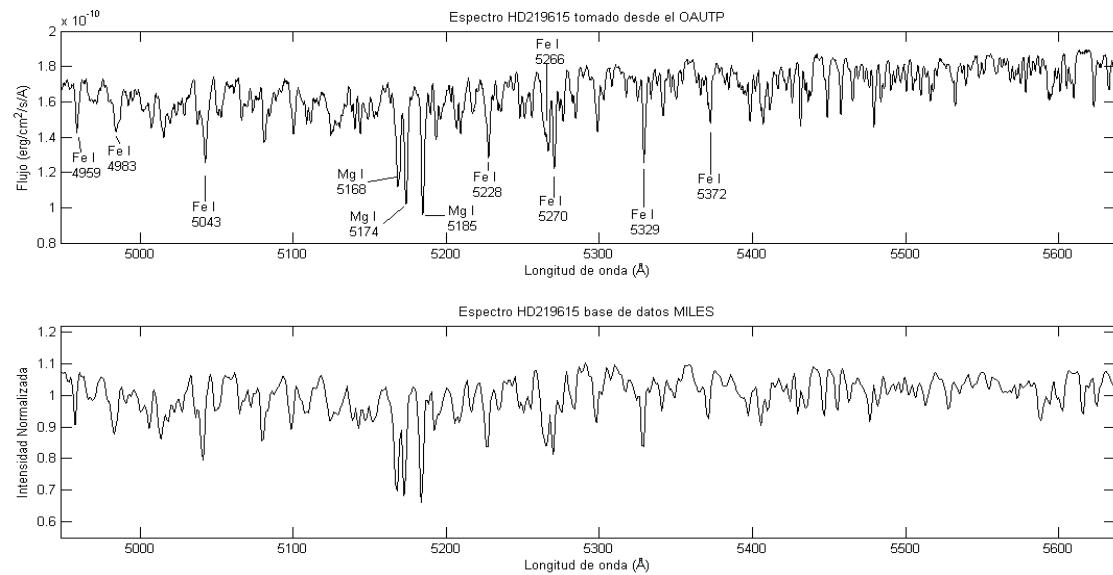


Figura 4.6: Espectro de la estrella *HD219615* (Gamma Piscium) en el rango 4948 \AA - 5639 \AA . Se identificaron líneas de Fe I y el característico triplete de magnesio

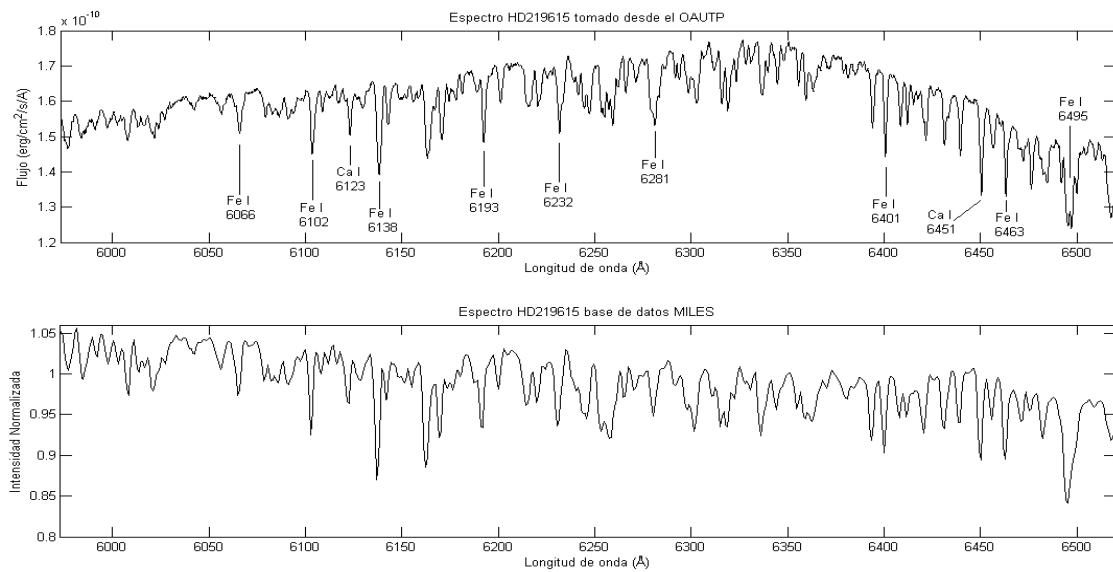


Figura 4.7: Espectro de la estrella *HD219615* (Gamma Piscium) en el rango 5973 \AA - 6520 \AA . Se identificaron líneas de Fe I y Ca I

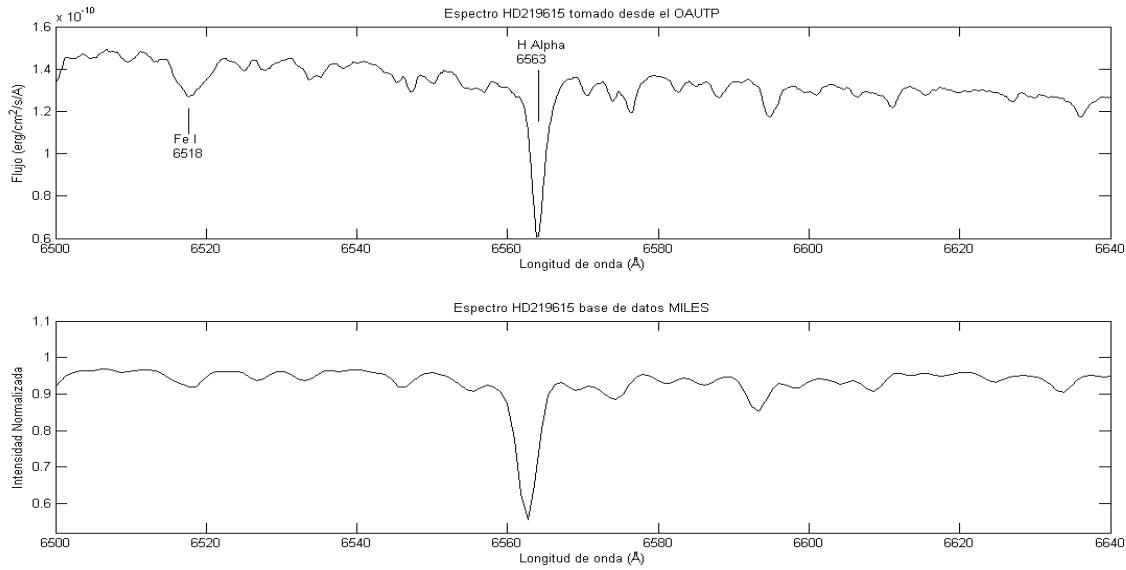


Figura 4.8: Espectro de la estrella *HD219615* (Gamma Piscium) en el rango 6500 \AA - 6640 \AA . Se identifican una línea de Fe I y la línea H alpha de la serie de Balmer

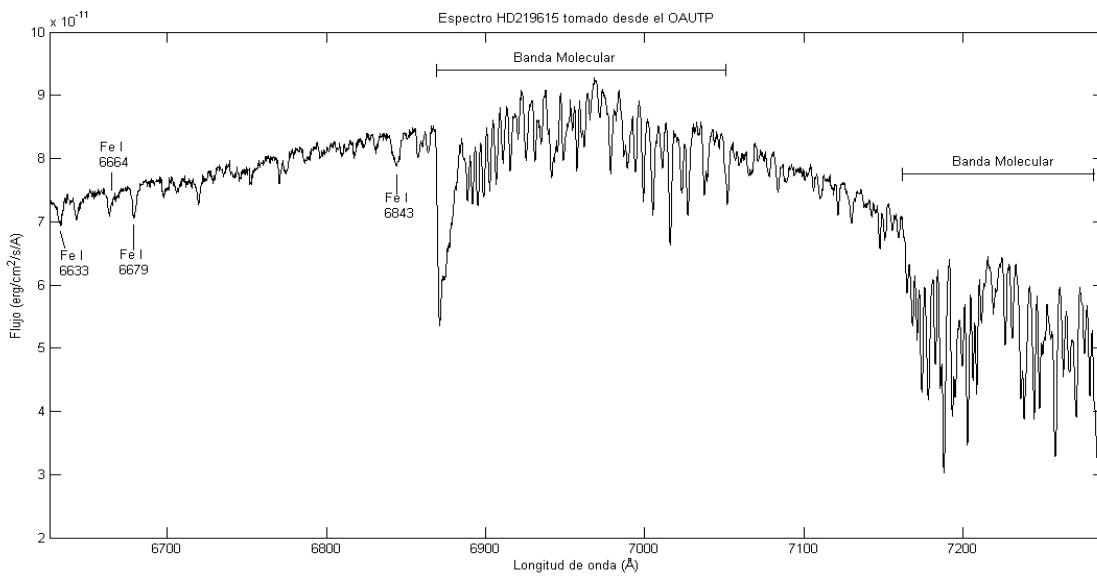


Figura 4.9: Espectro de la estrella *HD219615* (Gamma Piscium) en el rango 6626 \AA - 7289 \AA . Se identifican líneas de Fe I y las bandas moleculares correspondientes a la atmósfera terrestre

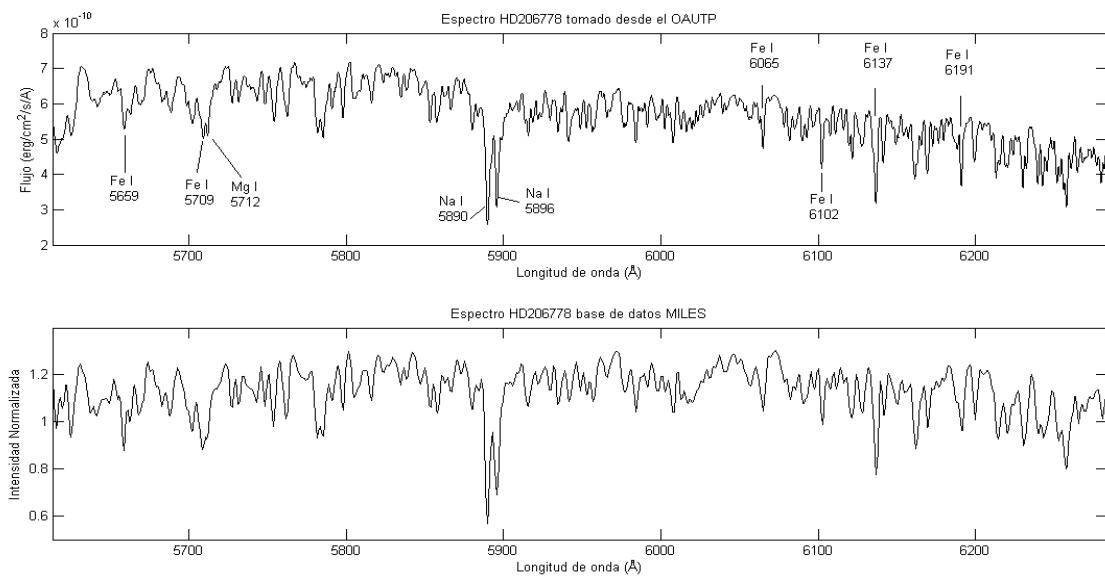


Figura 4.10: Espectro de la estrella *HD206778* (Enif o Epsilon Pegasi) en el rango 5613 \AA - 6283 \AA . Se identifican líneas de Fe I, Mg I y el doblete de sodio.

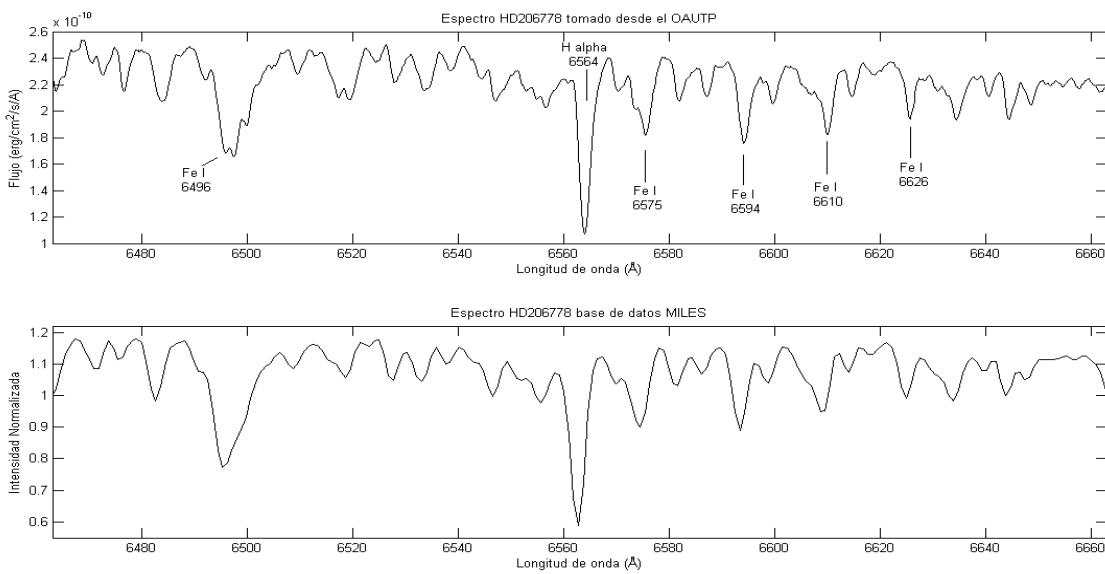


Figura 4.11: Espectro de la estrella *HD206778* (Enif o Epsilon Pegasi) en el rango 6463 \AA - 6663 \AA . Se identifican líneas de Fe I y la línea H alpha de la serie de Balmer

Objeto	Tipo de elemento	λ medida Å	λ NIST	Error (%)
HD168723	Fe I	4957	4958	0.02
HD168723	Fe I	4985	4985	0.00
HD168723	Fe I	5082	5083	0.02
HD168723	Mg I	5169	5167	0.04
HD168723	Mg I	5175	5173	0.04
HD168723	Mg I	5186	5184	0.04
HD168723	Fe I	5229	5227	0.04
HD168723	Fe I	5268	5269	0.02
HD168723	Fe I	5272	5270	0.04
HD168723	Fe I	5332	5333	0.02
HD168723	Mg I	5711	5711	0.00
HD168723	Fe I	5714	5715	0.02
HD168723	Na I	5892	5890	0.03
HD168723	Na I	5898	5896	0.03
HD168723	Fe I	6139	6138	0.02
HD168723	Fe I	6193	6192	0.02
HD168723	Fe I	6279	6281	0.03
HD168723	Fe I	6395	6394	0.02
HD168723	Fe I	6402	6400	0.03
HD168723	Fe I	6518	6518	0.00
HD168723	H	6565	6563	0.03
HD168723	Fe I	6663	6663	0.00
HD168723	Fe I	6680	6678	0.03
HD168723	Ca I	6720	6718	0.03
HD168723	Fe I	6844	6844	0.00
HD219615	Fe I	4959	4958	0.02
HD219615	Fe I	4983	4982	0.02
HD219615	Fe I	5043	5042	0.02
HD219615	Mg I	5168	5167	0.02
HD219615	Mg I	5174	5173	0.02
HD219615	Mg I	5185	5184	0.02
HD219615	Fe I	5228	5230	0.04
HD219615	Fe I	5266	5267	0.02
HD219615	Fe I	5270	5270	0.00
HD219615	Fe I	5329	5330	0.02
HD219615	Fe I	5372	5371	0.02
HD219615	Fe I	6066	6065	0.02
HD219615	Fe I	6102	6102	0.00
HD219615	Ca I	6123	6122	0.02
HD219615	Fe I	6138	6138	0.00

Continua en la siguiente página

Objeto	Tipo de elemento	λ medida Å	λ NIST	Error (%)
HD219615	Fe I	6193	6192	0.02
HD219615	Fe I	6232	6231	0.02
HD219615	Fe I	6281	6281	0.00
HD219615	Fe I	6401	6400	0.02
HD219615	Ca I	6451	6450	0.02
HD219615	Fe I	6463	6463	0.00
HD219615	Fe I	6495	6495	0.00
HD219615	Fe I	6518	6518	0.00
HD219615	H	6563	6563	0.00
HD219615	Fe I	6633	6633	0.00
HD219615	Fe I	6664	6663	0.01
HD219615	Fe I	6679	6678	0.01
HD219615	Fe I	6843	6843	0.00
HD206778	Fe I	5659	5659	0.00
HD206778	Fe I	5709	5709	0.00
HD206778	Mg I	5712	5711	0.02
HD206778	Na I	5890	5890	0.00
HD206778	Na I	5896	5896	0.00
HD206778	Fe I	6065	6065	0.00
HD206778	Fe I	6102	6102	0.00
HD206778	Fe I	6137	6138	0.02
HD206778	Fe I	6191	6192	0.02
HD206778	Fe I	6496	6495	0.01
HD206778	H	6564	6563	0.01
HD206778	Fe I	6575	6575	0.00
HD206778	Fe I	6594	6593	0.01
HD206778	Fe I	6610	6610	0.00
HD206778	Fe I	6626	6628	0.03

Tabla 4.2: Líneas de absorción identificadas en las atmósferas estelares

Capítulo 5

Conclusiones

- En este trabajo se logró identificar experimentalmente la configuración de la nueva rejilla de difracción, para la cual se obtiene un valor de 1200.161 ± 173.466 líneas/mm. Esta nueva rejilla fue instalada satisfactoriamente en el espectrógrafo *LHRES III* permitiendo obtener imágenes espetrales en mediana resolución. Así mismo se ajustó el foco del lente colimador para la nueva rejilla de difracción obteniendo un FWHM de 8 píxeles para las líneas de emisión de la lámpara de calibración interna de neón.
- Se identificaron un total de 84 líneas de emisión de las lámparas de Ne y Ne-Ar del espectrógrafo *LHRES III* y de las lámparas de emisión del Laboratorio de Física III y en base en ellas se construyó la curva de calibración que permite determinar la relación existente entre la longitud de onda estudiada y la posición del tornillo micrométrico, la cual esta descrita por la función $P(x) = 1.37 \times 10^{-8}x^2 + 0.0011729x + 1.3737 \pm inc$, lo que garantiza la confiabilidad en los datos espectroscópicos en mediana resolución que se obtienen mediante este instrumento.
- Se implementó una metodología que permite calibrar en flujo los espectros obtenidos desde el Observatorio Astronómico de la UTP, a través del software de reducción y análisis de imágenes astronómicas *IRAF*.
- Los espectros de las estrellas *HD168723*, *HD219615* y *HD206778* obtenidos desde el Observatorio Astronómico de la UTP coinciden con los espectros almacenados en la base de datos *MILES* con errores inferiores a 2 Å, y se lograron identificar líneas de absorción correspondientes a los elementos presentes en sus atmósferas estelares, con lo cual se valida la pertinencia de la metodología desarrollada en este trabajo.
- Como producto de este trabajo de investigación se optimiza y actualiza el software *Lambda For LHRES III V2.0* en el cual se recogen todos los trabajos desarrollados hasta el presente en la línea de espectroscopía desde el Observatorio Astronómico de la UTP, posicionando esta herramienta computacional como indispensable en los futuros estudios espectroscópicos en alta o mediana resolución y abriendo la puerta a nuevas investigaciones que puedan seguir aportando nuevas funciones o mejoras a posteriores

versiones de *Lambda For Lhires III*.

Anexos A

Entorno LAMBDA FOR LHIRES III

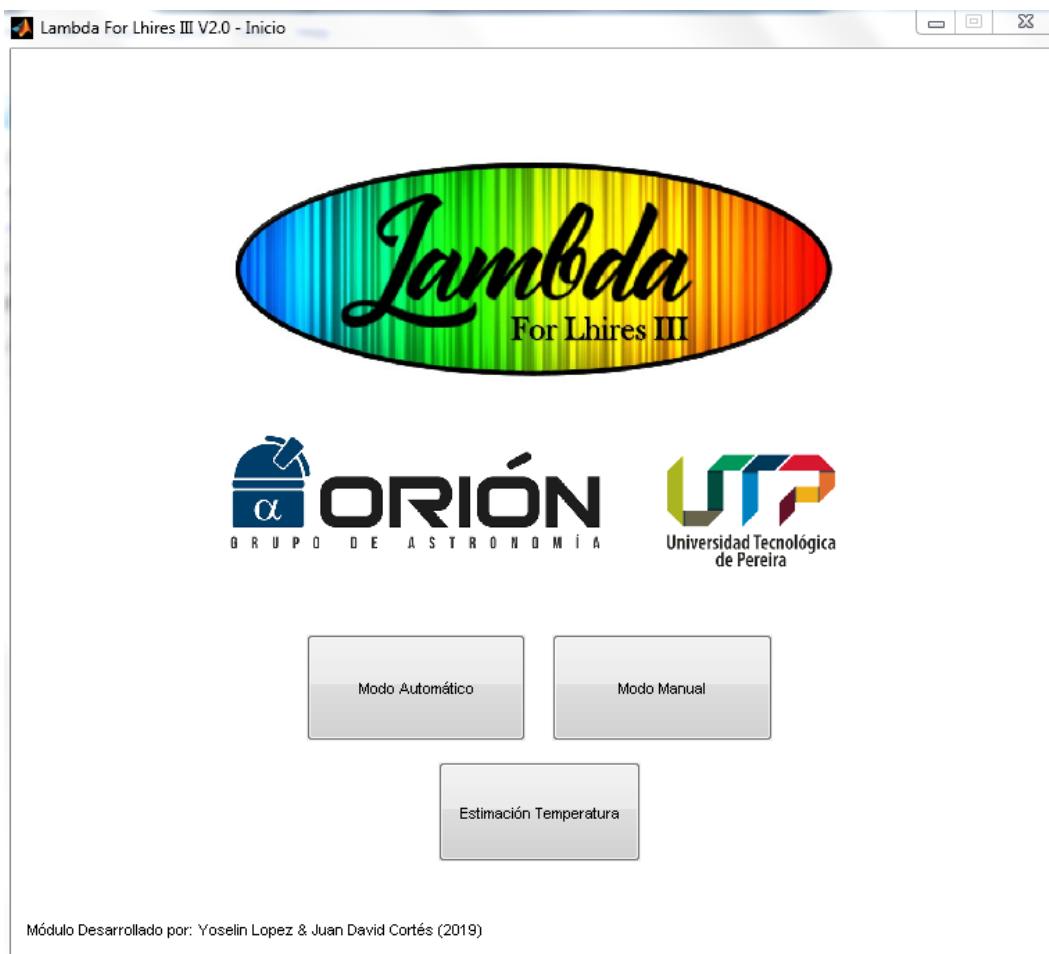


Figura A.1: Ventana de Inicio Software *Lambda For LHIRES III V 2.0*



Figura A.2: Ventana de selección de rejilla de difracción

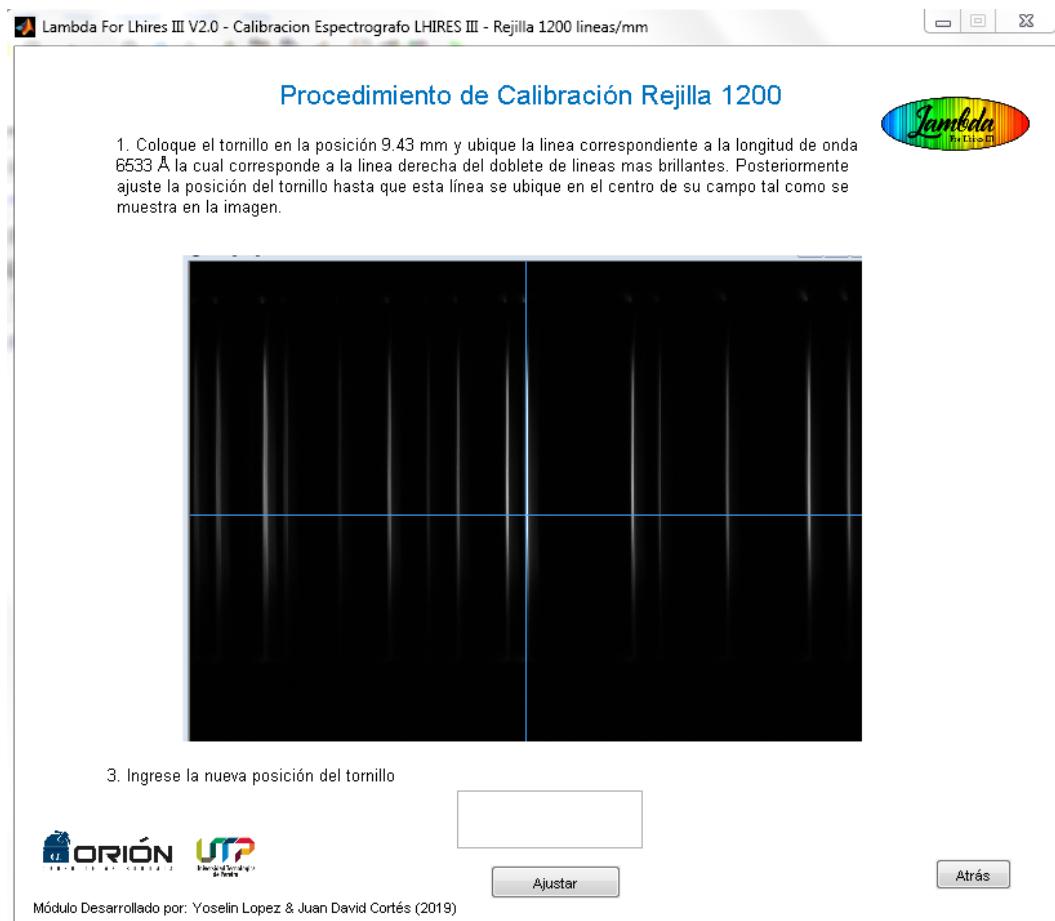


Figura A.3: Configuración de tornillo micrométrico respecto a la línea de Ne con longitud de onda 6402Å

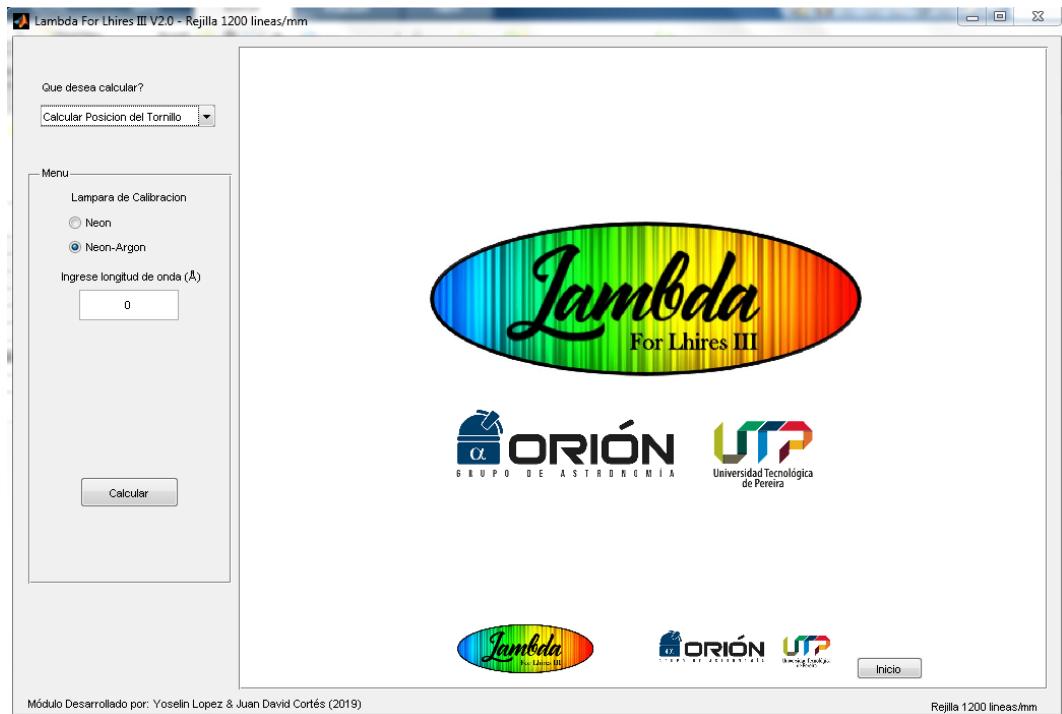


Figura A.4: Entorno gráfico para calcular la posición del tornillo micrométrico o la longitud de onda de estudio

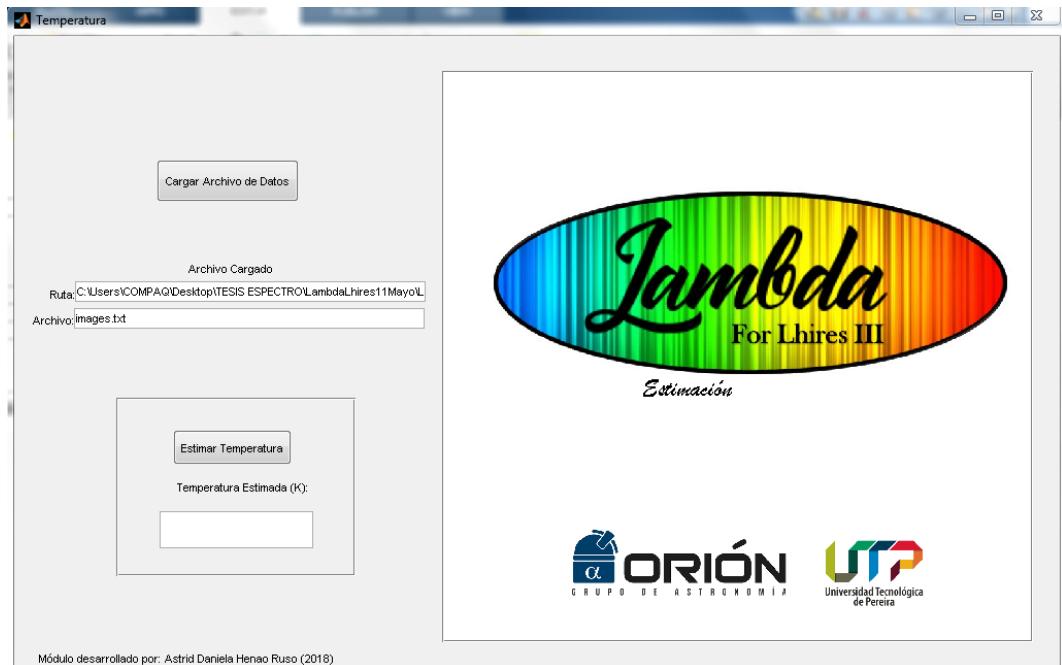
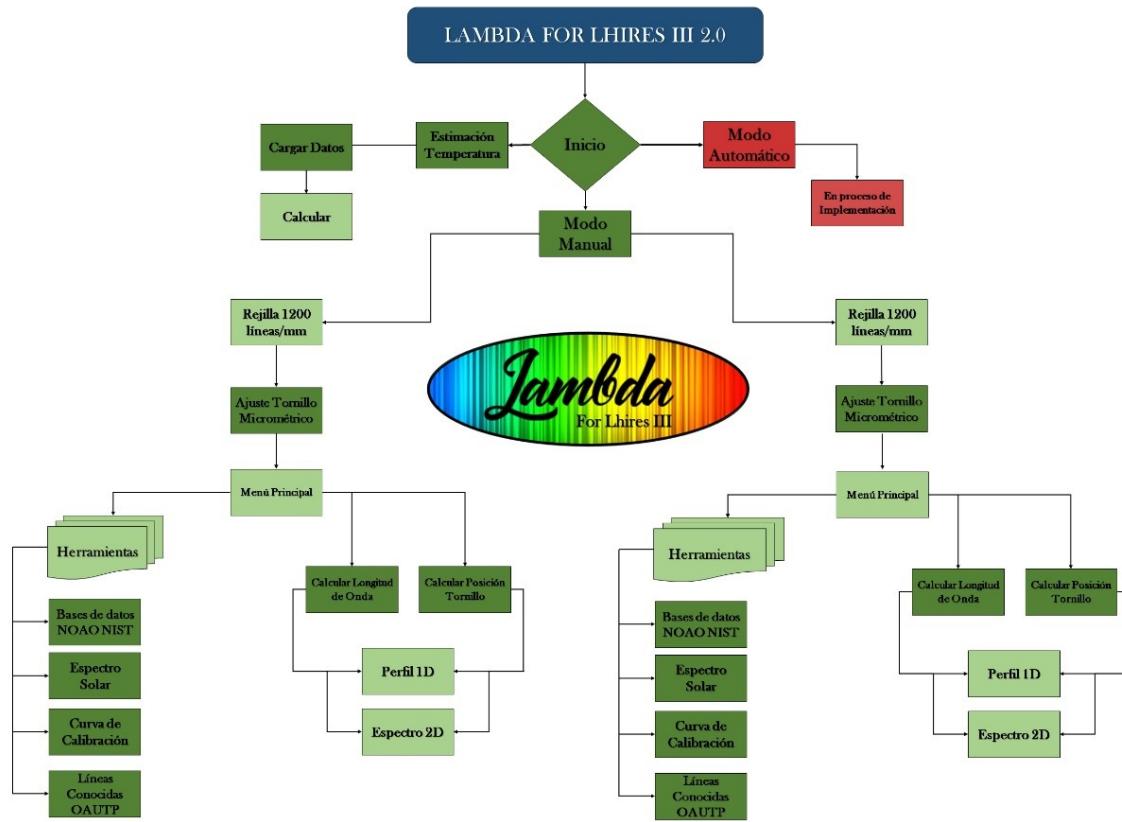


Figura A.5: Entorno gráfico para la estimación de temperaturas.

Figura A.6: Esquema general *Lambda For LHIRES III V 2.0*

Anexos B

Estrellas estándar de IRAF para calibración en flujo

STANDAR STARS

Estrellas estándar en onedstds\$bstdscal/

hr718	hr3454	hr3982	hr4468	hr4534
hr5191	hr5511	hr7001	hr7596	hr7950
hr8634	hr9087	hd15318	hd74280	hd100889
hd188350	hd198001	hd214923	hd224926	

Estrellas estándar en onedstds\$ctiocal/

bd25	eg139	feige56	l2415	l93080
bd73632	eg149	feige98	l2511	l97030
bd8	eg158	g16350	l3218	lds235
cd32	eg248	g2631	l3864	lds749
eg11	eg274	g9937	l4364	ltt4099
eg21	f15	h600	l4816	ltt8702
eg26	f25	hz2	l6248	ross627
eg31	f56	hz4	l7379	w1346
eg54	f98	hz15	l7987	w485a
eg63	f110	kopf27	l8702	wolf1346
eg76	feige110	l377	l9239	wolf485a
eg79	feige15	l1020	l9491	
eg99	feige25	l1788	l74546	

Estrellas estándar en onedstdsctionewcal/

Combinado rojo - azul 3300A-10000A:

cd32	f56	l2415	l4364	l7987
eg21	h600	l3218	l4816	l9239
eg274	l1020	l377	l6248	l9491
f110	l1788	l3864	l7379	l745

Azul 3300A-7550A:

cd32blue	f56blue	l2415blue	l4364blue	l7987blue
eg21blue	h600blue	l3218blue	l4816blue	l9239blue
eg274blue	l1020blue	l377blue	l6248blue	l9491blue
f110blue	l1788blue	l3864blue	l7379blue	

Rojo 6050A-10000A:

cd32red	f56red	l2415red	l4364red	l7987red
eg21red	h600red	l3218red	l4816red	l9239red
eg274red	l1020red	l377red	l6248red	l9491red
f110red	l1788red	l3864red	l7379red	l745red

Estrellas estándar en onedstdsiidscal/

40erib	eg50	eg149	g16350	hz4	lds235b
amcvn	eg54	eg158	g191b2b	hz7	lds749b
bd253941	eg63	eg162	g2610	hz14	lft1655
bd284211	eg67	eg182	g2631	hz15	lp414101
bd332642	eg71	eg184	g4718	hz29	ltt13002
bd404032	eg76	eg193	g88	hz43	ltt16294
bd73632	eg77	eg247	g9937	hz44	ltt4099
bd7781	eg79	eg248	gd128	kopff27	ltt8702
bd82015	eg91	feige15	gd140	l13633	ross627
eg11	eg98	feige24	gd190	l140349	ross640
eg20	eg99	feige25	gh7112	l14094	sa29130
eg26	eg102	feige34	grw705824	l151234b	sao131065
eg28	eg119	feige56	grw708247	l74546a	ton573
eg29	eg129	feige92	grw738031	l8702	wolf1346
eg31	eg139	feige98	he3	l93080	wolf485a

eg33	eg144	feige110	hiltner102	l97030
eg39	eg145	g12627	hiltner600	lb1240
eg42	eg148	g14563	hz2	lb227

Estrellas estándar en onedstds*sirscal*/

bd082015	eg50	feige34	hd117880	hd60778	hr7001
bd174708	eg71	feige56	hd161817	hd74721	hz44
bd253941	eg139	feige92	hd17520	hd84937	kopff27
bd262606	eg158	feige98	hd192281	hd86986	wolf1346
bd284211	eg247	feige110	hd19445	he3	
bd332642	feige15	g191b2b	hd217086	hiltner102	
bd404032	feige25	hd109995	hd2857	hiltner600	

Estrellas estándar en onedstds*oke1990*/

bd284211	feige110	feige67	g191b2b	g249	gd248
bd75325	feige34	g13831	g19374	gd108	hz21
ltt9491	eg71	eg158	eg247		

Estrellas estándar en onedstds*redcal*/

40erib	eg63	eg139	eg248	gd140	hz44	ltt16294
amcvn	eg67	eg144	feige24	gd190	l13633	ltt4099
bd7781	eg76	eg145	g12627	grw705824	l14094	ltt8702
bd73632	eg79	eg148	g14563	grw708247	l151234b	ross627
bd174708	eg91	eg149	g16350	grw738031	l74546a	ross640
bd262606	eg98	eg162	g191b2b	hd19445	l93080	sa29130
eg20	eg99	eg182	g2610	hd84937	l97030	sao131065
eg33	eg102	eg184	g2631	he3	lds235b	wolf1346
eg50	eg119	eg193	g4718	hz29	lds749b	wolf485a
eg54	eg129	eg247	g9937	hz43	lft1655	

Estrellas estándar en onedstds*spec16cal* :

Combinado rojo - azul 3300A-10300A:

hd15318	hd74280	hd114330	hd188350	hd214923
hd30739	hd100889	hd129956	hd198001	hd224926

72 ANEXOS B. ESTRELLAS ESTÁNDAR DE IRAF PARA CALIBRACIÓN EN FLUJO

hr1544	hr4468	hr5501	hr7596	hr8634
hr3454	hr4963	hr718	hr7950	hr9087

Azul 3300A-7550A:

hd15318blue	hd74280blue	hd114330blue	hd188350blue	hd214923blue
hd30739blue	hd100889blue	hd129956blue	hd198001blue	hd224926blue
hr1544blue	hr4468blue	hr5501blue	hr7596blue	hr8634blue
hr3454blue	hr4963blue	hr718blue	hr7950blue	hr9087blue

Rojo 6020A-10300A:

hd15318red	hd74280red	hd114330red	hd188350red	hd214923red
hd30739red	hd100889red	hd129956red	hd198001red	hd224926red
hr1544red	hr4468red	hr5501red	hr7596red	hr8634red
hr3454red	hr4963red	hr718red	hr7950red	hr9087red

Estrellas estándar en onedstdsspec50cal/3200A – 8100A

bd284211	eg247	feige34	hd192281	pg0205134	pg0934554	wolf1346
cygob2no9	eg42	feige66	hd217086	pg0216032	pg0939262	
eg139	eg71	feige67	hilt600	pg0310149	pg1121145	
eg158	eg81	g191b2b	hz14	pg0823546	pg1545035	
eg20	feige110	gd140	hz44	pg0846249	pg1708602	

Estrellas estándar en onedstdsspec50cal/3200A – 10200A

bd284211	eg247	feige34	g191b2b	hz44
eg139	eg71	feige66	gd140	pg0823546
eg158	feige110	feige67	hilt600	wolf1346

Estrellas estándar en onedstdsspechayescal/

bd284211	eg139	feige67	hd217086	pg0216032	pg0939262
cygob2no9	eg158	feige110	hiltner600	pg0310149	pg1121145
eg42	eg247	g191b2b	hz14	pg0823546	pg1545035
eg71	feige34	gd140	hz44	pg0846249	pg1708602
eg81	feige66	hd192281	pg0205134	pg0934554	wolf1346

Tabla B.1: Estrellas estandar de IRAF para calibración en flujo

Anexos C

Observatorios Astronómicos incluidos en la base de datos de *IRAF*

Observatory	Name
kpno	Kitt Peak National Observatory
ctio	Cerro Tololo Interamerican Observatory
eso	European southern Observatory
lick	Lick Observatory
mmto	Multiple Mirror Telescope Observatory
flwo	Whipple Observatory
cfht	Canada-France-Hawaii Telescope
lapalma	Roque de los Muchachos, La Palma
mso	Mt. Strolmo Observatory
sso	Siding Spring Observatory
aao	Anglo-Australian Observatory
mcdonald	McDonald Observatory
lco	Las Campanas Observatory
mtbigelow	Catalina Observatory: 61 inch telescope
dao	Dominion Astrophysical Observatory
spm	Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir
tona	Observatorio Astronómico Nacional Tonantzintla
palomar	The Hale Telescope
mdm	Michigan-Dartmouth-MIT Observatory
NOV	National Observatory of Venezuela
bmo	Black Moshannon Observatory
BAO	Beijing XingLong Observatory
keck	W. M. Keck Observatory

Continua en la siguiente página

Observatory	Name
ekar	Mt. Ekar 182 cm. Telescope
apo	Apache Point Observatory
lowell	Lowell Observatory
vbo	Vainu Bappu Observatory

Tabla C.1: Observatorios en base de datos de *IRAF*

Bibliografía

- [1] Andres Ballesteros and Beatriz Sabogal. Estudio espectroscópico de las estrellas 12 vulpécula y cu virgins. In *CONGRESO COLOMBIANO DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA*, pages 1–4, 2014.
- [2] André Baranne, D Queloz, Michel Mayor, G Adrianzyk, G Knispel, D Kohler, D Lacroix, J-P Meunier, G Rimbaud, and A Vin. Elodie: A spectrograph for accurate radial velocity measurements. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 119(2):373–390, 1996.
- [3] Jose Luis Doreste Caballero and Agrupacion Astronomica de Gran Canaria. Tratamiento de imagenes ccd astronomicas. 2002.
- [4] Departamento de Astronomia. *Clasificacion Espectral de Estrellas*. Instituto de Fisica de la Facultad de Ciencias, Universidad de la Republica, Uruguay, 2011.
- [5] V Desnoux. Transition of the h-alpha line from absorption to a double-peaked emission in the be star hd 224544. *The Astronomer's Telegram*, 6362, 2014.
- [6] S Dodorico and D Ponz. On the accuracy of the wavelength calibration and of the flat-fielding of the ccd caspec spectra. *The Messenger*, 37:24–26, 1984.
- [7] Thomas Eversberg and Klaus Vollmann. *Spectroscopic instrumentation*. Springer, 2015.
- [8] Juan Fabregat. *Espectroscopia Observacional*. Departamento de Fisica, Universidad de Valencia, 2010.
- [9] Angelica María Guapacha. Calibración del espectrógrafo lhires iii del observatorio astronómico de la universidad tecnológica de pereira.
- [10] John B Hearnshaw. *The analysis of starlight: two centuries of astronomical spectroscopy*. Cambridge University Press, 2014.
- [11] Benjamin G Jenkins. A study of the lhires iii spectrograph on the hard labor creek observatory 20 inch telescope. 2011.
- [12] Tennyson Jonathan. *Astronomical spectroscopy: An introduction to the atomic and molecular physics of astronomical spectra*, volume 2. World Scientific, 2010.
- [13] Ralchenko Yu. Reader J. Kramida, A. and NIST ASD Team (2019). Nist atomic spectra database (version 5.7.1), [online]. available: <https://physics.nist.gov/asd> [tue nov 05 2019].

- [14] Sosa Marina and Ileana Andruchow. *Breve Introducción al Uso de IRAF*, 2015.
- [15] Meade Instruments Corporation. *Instruction Manual Meade LX200GPS Smithdt Cassegrain Telescope*, 2003.
- [16] Optometrics Corporation. *Diffractions Gratings 2011 Catalog*, 2011.
- [17] Christopher A Palmer and Erwin G Loewen. *Diffraction grating handbook*, volume 5. Thermo RGL New York, 2002.
- [18] Keith Robinson. *Spectroscopy: The Key to the Stars*. Springer, 2007.
- [19] Astrid Daniela Henao Russo. Estimación de la temperatura efectiva para estrellas de tipo espectral k, a partir de espectroscopía de alta resolución.
- [20] SBIG Astronomical Instruments, A Division of Diffraction Limited. *Operating Manual for STF-8300 Series Cameras*, 2011.
- [21] SBIG Astronomical Instruments, A Division of Diffraction Limited. *Operating Manual for ST-i Series*, 2017.
- [22] Shelyak Instruments. *LHRES III High Resolution Spectrograph, Technical Data - Mechanical*.
- [23] Shelyak Instruments. *LHRES III User Guide*, 2006.
- [24] Shelyak Instruments. *Lhires III Upgrade kit Guiding Calibration User guide*, 2015.
- [25] Claus Tappert. *Reducción de datos espectroscópicos*. Instituto de Física y Astronomía Universidad de Valparaíso, Chile, 2017.
- [26] Olivier Thizy. *Lhires III High Resolution Spectrograph*. Society for Astronomical Sciences Annual Symposium, 2007.
- [27] Thor Labs, Inc. *Optics. Introduction to Diffractions Gratings*.
- [28] Marc FM Trypsteen and Richard Walker. *Spectroscopy for Amateur Astronomers: Recording, Processing, Analysis and Interpretation*. Cambridge University Press, 2017.
- [29] Tomaž Zwitter and Ulisse Munari. *An introduction to analysis of single dispersion spectra with IRAF*, volume 1. Osservatori Astronomici di Padova e Asiago, Italy, 2000.