

**Trabajo de Fin de Máster e Iniciación a
la Investigación:**

**“Análisis de Espectros de
Alta Resolución de Estrellas
Frías en el Infrarrojo
Cercano/
Analysis of High Resolution
Spectra of Cool Dwarfs in
the Near Infrared”**



Paulo Alberto Miles Páez (pamp@iac.es)

Máster Interuniversitario en Astrofísica

UCM-UAM

Supervisor: David Montes (dmg@astrax.fis.ucm.es, UCM)

Créditos: 18

Resumen:

En este trabajo se presenta una colección de espectros de 17 estrellas de tipo solar (tipos desde G8V hasta M6.5V) obtenidos de la base de datos del observatorio W. M. Keck mediante el espectrógrafo echelle NIRSPEC ($R \approx 20000$) con el fin de identificar líneas sensibles a la actividad estelar, gravedad y temperatura en el rango 1.2-1.8 μm . Para ello se redujeron los espectros crudos de cada estrella, se representaron por tipos espectrales y se identificaron las líneas que presentaban variaciones, la identificación de las líneas se realizó mediante el atlas infrarrojo de Arturo (Hinkle K., et al. 1995), en total se han identificado 225 líneas y se ha hecho el análisis de 21 de estas mediante métodos estadísticos paramétricos y no paramétricos.

En este trabajo queda de manifiesto además la potencia actual de las bases de datos disponibles en astrofísica y el cambio que ha ocurrido en las últimas décadas en las que se ha pasado de hacer ciencia sólo si se disponía de tiempo de observación en algún telescopio a poder hacer ciencia haciendo uso exclusivo de las bases de datos de los observatorios actuales.

***Palabras clave:** Líneas: identificación, **Técnicas:** espectroscopía, **Instrumentación:** espectrógrafos, **Bases de datos astronómicas:** OV, **Estrellas:** de tipo solar, tipos tardíos, actividad, cromosferas, **Infrarrojo:** estrellas

Abstract:

I present a sequence of high resolution spectra ($R \approx 20000$) of 17 solar-type stars (G8V-M6.5V). The spectra were taken from KOA (Keck Observatory Archive) that contains raw spectra obtained with NIRSPEC. In this work I pretend to identify sensitive lines to stellar activity, gravity and temperature in the range 1.2-1.8 μm . In order to identify sensitive lines, I reduced the raw spectra of each star, later on they were plotted by spectral type and I made a list of the lines that presented some variation in the different spectral types, also I used the infrared atlas of Arcturus spectrum (Hinkle K., et al. 1995) to make the identification of the lines, 225 lines have been found as a result of this work and 21 of them have already been analyzed by parametric and non parametric statistical tests. On the other hand, the value of the virtual observatory is shown in this project as I have been able to make science only with the use of the available databases on astrophysics at present.

***Keywords:** Lines: identification, **Techniques:** spectroscopic, **Instrumentation:** spectrographs, **Astronomical Data Bases:** VO, **Stars:** solar-type, late-type, activity, chromospheres, **Infrared:** stars.

Indice:

1. Introducción	2
2. Datos	3
2.1 Búsqueda	3
2.2 Datos disponibles	4
2.3 Reducción	5
2.4 Órdenes conseguidos	11
3. Análisis y Resultados	12
3.1 Procedimiento	12
3.2 Candidatos	12
3.2.1 ¿Causas de las variaciones?	13
3.3 Variaciones de las líneas con el tipo espectral	15
3.3.1 Análisis de algunas líneas	17
4. Conclusiones, Principal Aporte del Estudiante y Trabajo Futuro	20
5. Agradecimientos	
6. Bibliografía	
Apéndice A: Espectros obtenidos	

1. Introducción:

La espectroscopía siempre ha sido una herramienta fundamental para entender los diferentes procesos físicos que ocurren en un objeto de interés astrofísico.

En particular en este trabajo nos interesa el rango infrarrojo cercano (a partir de ahora NIR, 0.9 – 1.8 μm) en el que las estrellas frías y muy frías presentan su pico de emisión.

Por otra parte el NIR hasta ahora ha sido pobremente estudiado si se compara con el rango óptico y la mayoría de estos estudios se han realizado con bajas resoluciones.

No obstante, es un rango muy útil por ejemplo, estudiando los procesos físicos y químicos que ocurren en una atmósfera estelar podemos obtener líneas de referencia que pueden tener aplicación directa a otros objetos astrofísicos como puede ser el estudio de los distintos tipos de galaxias que pueden haber, también es un rango de mucho valor en el campo de objetos subestelares el cual se encuentra de moda actualmente, siendo una de las aplicaciones más claras la medida de velocidades radiales.

Sin embargo, con el advenimiento de instrumentos de resolución media-alta como NIRSPEC¹ (near-IR echelle spectrograph for the Keck II 10-meter telescope, Mclean et al. 1998) o alta como CRIRES² (CRYogenic high-resolution InfraRed Echelle Spectrograph for the VLT, ESO) los estudios en baja resolución ($R < 3000$; Wallace & Hinkle 1997, Meyer et al. 1998, Rayner et al. 2009 o Pickles et al. 1998) se han quedado desfasados y urge la necesidad de realizar estudios a mayores resoluciones, por ejemplo Sharon et al. (2010) ha hecho una librería con la misma resolución que en este trabajo pero en la banda Y (0.95-1.11 μm).

Además existen varios instrumentos en fase de desarrollo como CARMENES³ (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exo-earths with a Near-infrared Echelle Spectrograph, Quirrenbach et al. 2010) en el telescopio de 3.5 m de Calar Alto (Almería), GIANO, SPIRou, HZPF, SIMPLE y otros posibles proyectos como NAHUAL (Near-infrARed High-resolUtion spectrogrAph for pLanet hunting) en el GTC (Canarias) o UPF que supondrán un tremendo avance en este rango y los cuales demandarán librerías de espectros de alta resolución.

Por eso en este trabajo se ha realizado una recopilación de espectros de alta resolución de estrellas de tipo solar para su posterior análisis, la organización de esta memoria es como sigue: en la sección 2 se explica qué datos se buscaron, cómo se buscaron y dónde se buscaron, así como el proceso de reducción y los principales problemas encontrados, en la sección 3 se explica el análisis de los espectros reducidos y los resultados obtenidos, en la sección 4 se explican las principales conclusiones obtenidas con este trabajo así como el trabajo futuro que queda (ya que ***no se trata de un trabajo que esté acabado aún***) y ***la principal aportación del autor***, finalmente las secciones 5 y 6 se han reservado para agradecimientos y para enumerar la bibliografía consultada, los espectros obtenidos se presentan al final del todo en el apéndice A.

¹<http://www2.keck.hawaii.edu/inst/nirspec/>

²<http://www.eso.org/~rsiebenm/crides/>

³<http://carmenes.caha.es/>

2. Datos:

2.1 Búsqueda:

Cuando se planteó este trabajo en agosto del 2010, la idea consistía en buscar espectros de alta resolución en el NIR de estrellas enanas (V) de tipos G, K y M que estuvieran disponibles en las bases de datos actuales.

Después de realizar una extensiva búsqueda durante los meses de septiembre y octubre del 2010, sólo se encontraron librerías con resoluciones bajas (ver referencias en la introducción).

Sin embargo, sí se encontraron espectros de alta resolución en el NIR, *pero crudos*, estos espectros estaban disponibles en las bases de datos del ESO (tomados con el instrumento CRIRES) y del observatorio W. M. Keck (tomados con el instrumento NIRSPEC).

A primera vista parecían más interesantes los espectros del instrumento **CRIRES** debido a su alta resolución ($R \approx 100000$), el problema que se encontró (insalvable de momento) son los permisos, ya que hay muchos espectros de estrellas en el rango y de los tipos que nos interesan pero, **no eran públicos en ese momento** (aunque aparecen anunciados en la base de datos).

El siguiente paso fue acudir a revisar los espectros de la base de datos del observatorio W. M. Keck (a partir de ahora KOA⁴) y encontramos que literalmente es una mina ya que posee una enorme cantidad de datos para los instrumentos HIRES⁵ (espectros con $R \approx 80000$, en el óptico) para el cual se ofrecen los espectros crudos o reducidos de forma automática por un software propio y para NIRSPEC que cubre nuestro rango de interés aunque la resolución es menor que en el caso de CRIRES.

Una vez decidimos que usaríamos espectros de NIRSPEC, el siguiente paso fue buscar qué datos había y cuales servían.

NIRSPEC es un espectrógrafo echelle que puede obtener espectros a baja resolución ($R \sim 2000$) y a media-alta ($R \sim 20000$) con distintas configuraciones en el rango $0.9\text{-}5.0 \mu\text{m}$ y con distintos filtros: NIRSPEC1, NIRSPEC2...NIRSPEC7, así como otros filtros cortos que se pueden consultar en la página web del KOA.

Por otra parte los datos (crudos) disponibles son aquellos pertenecientes a los distintos proyectos estratégicos del instrumento y los cuales se van haciendo públicos cada cierto tiempo (según las normas de privacidad del observatorio W. M. Keck).

Con todo lo anterior, acudí a SIMBAD y descargué listas de estrellas de tipos comprendidas entre G8V, G8.5V, G9V, G9.5V, K0V... M9.5V, en las cuales me interesaba el nombre, y sus coordenadas (α y δ en ICRS).

⁴ <https://koa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/KOA/nph-KOALogin>

⁵ <http://www2.keck.hawaii.edu/inst/hires/>

Las listas obtenidas contenían miles de datos, con estas listas acudí al KOA y realicé una búsqueda para saber qué estrellas habían sido observadas con NIRSPEC (y HIRES) y qué datos estaban disponibles (filtro con el que habían sido observadas ya que había que asegurarse de que las estrellas a analizar hubieran sido observadas en el mismo rango espectral). En la siguiente imagen se muestra un resumen de este proceso de búsqueda.

SIMBAD:

-GENERO LISTAS DE ESTRELLAS COMPRENDIDAS ENTRE G8V y M9V
 (considerando tipos intermedios, es decir, G8.5V, G9.5V, K0.5V...)

NAME	RA	DEC
BD+44 335	024.522191	+44.818034
GJ 34 C	012.2200	+57.8144
GJ 122	047.268644	+76.041161
LHS 28	075.849589	+53.128470
2MASS J16411543+5344110	250.31433	+53.73642
LHS 6128	113.614300	+62.941501
LHS 2018	127.484699	+61.725756
LTT 12657	149.625189	+67.054457
2MASS J15235385+5609320	230.97442	+56.15889
HD 238224	200.847073	+57.906147

KOA:

-CON LAS LISTAS GENERADAS SE CONSULTA PARA CADA ESTRELLA SI HA SIDO OBSERVADA EN EL RANGO NIR

-CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS SE ANALIZA CUALES HAN SIDO OBSERVADOS EN EL MISMO RANGO ESPECTRAL (NIRSPEC POSEE DIFERENTES FILTROS DENTRO DE NUESTRA DEFINICIÓN DE NIR), LAS COINCIDENCIAS SERÁN NUESTROS OBJETOS A ANALIZAR.

Figura 1. Resumen del proceso de búsqueda en el KOA.

2.2 Datos Disponibles:

Del cruce de las listas anteriores encontramos bastantes datos útiles (algunos fuera del rango NIR y que se discutirán en la sección 4 de esta memoria), en la siguiente tabla se enumeran las estrellas que se analizarán en este trabajo:

Estrella	Tipo Espectral	α (J2000)	δ (J2000)	Fecha de Observación
BS7368	G8V	19:23:34.1	+33:13:21.4	2000-06-19
HD195987	G9V	20:32:52.4	+41:53:55.1	2002-07-17
G112-54	K0V	07:54:33.8	-01:24:49.9	2001-01-07
HD26794	K3V	04:14:30.0	+03:01:25.1	2007-03-06
HD98800	K5V	11:22:05.3	-24:46:39.8	2000-06-11
GJ1069	K5V	04:15:09.1	-04:25:07.4	2001-01-07
GI763	K8V	19:34:39.3	+04:34:53.3	2000-06-10
LkCa3	M1V	04:14:47.6	+27:52:30.7	2003-11-05
GI15A	M2V	00:18:23.2	+44:01:21.8	2000-06-11
2MASSJ02515408+2227299	M4V	02:51:54.4	+22:27:34.6	2004-12-25
GI402	M4V	10:50:52.2	+06:48:28.4	2001-01-05
GJ1227	M4.5V	18:22:28.4	+62:03:02.2	2008-11-07
GI234A	M4.5V	06:29:23.2	-02:48:50.0	2006-02-12
HD134319B	M5V	15:05:48.9	+64:02:51.7	2006-05-19
GJ1156	M5V	12:18:58.9	+11:07:39.9	2007-12-22
GI905	M5V	23:41:55.3	+44:10:35.9	2000-06-07
GI406	M6.5V	10:56:28.7	+07:00:53.7	2003-11-05

Tabla 1. Objetos seleccionados del KOA para ser analizados en este trabajo.

Estrella	Programa	PI
BS7368	The Secondary Mass Distribution down to the Brown Dwarf Limit	Simon
HD195987	The Masses and Luminosities of Population II Stars	Blake
G112-54	The Secondary Mass Distribution down to the Brown Dwarf Limit	McLean
HD26794	Assessing the Inner Structure and Gas Content of Transitional Disks	Simon
HD98800	Young Star Double-Lines Spectroscopic Binaries	Larkin
GJ1069	The Secondary Mass Distribution down to the Brown Dwarf Limit	Prato
G1763	Diffraction Limited Imaging and Spectroscopy of Faint Field Galaxies	McLean
LkCa3	Dynamical Mass Ratios of Young Substellar Binaries	Prato
G115A	Young Star Double-Lines Spectroscopic Binaries	Prato
2MASSJ02515408+2227299	Dynamical Mass Ratios of Young Substellar Binaries	McLean
G1402	Young Star Double-Lined Spectroscopic Binaries	Prato
GJ1227	Spectroscopic rotation velocities of brown dwarfs in IC 348	Hillenbrand
G1234A	Calibration of Spectral Modeling Techniques for Determining	Stassun
HD134319B	The NIRSPEC Brown Dwarf Spectroscopic Survey (BDSS): Atmospheres	McLean
GJ1156	The NIRSPEC planet search in late-M dwarfs: initial survey of 70 targets	Martin
G1905	Identifying the Lowest Mass Members of the Lambda Ori Cluster	Stauffer
G1406	Dynamical Mass Ratios of Young Substellar Binaries/Identifying the Lowest Mass Members of the Lambda Ori Open Cluster	Prato/Stauffer

Tabla 2. Información sobre los distintos proyectos de los que vienen los datos que vamos a manejar en este trabajo.

En las tablas anteriores se recogen los datos de los objetos que se analizarán en este trabajo, como puede verse, todos provienen de distintos proyectos por lo que algunos detalles como la relación señal-ruido no será la misma para todos, aunque como se verá en los espectros reducidos serán similares.

Con la lista de objetos a analizar bien definida, el siguiente paso fue **reducir los espectros**.

2.3 Reducción:

Si bien los objetos de nuestra muestra provienen de distintos programas, la forma de reducirlos es bastante similar en todos los casos ya que todos han sido observados siguiendo el patrón ABBA, la diferencia está en la calibración de longitud de onda ya que en algunos casos se usaron lámparas (de Ar, Kr, Ne y Xe) y en otros se usaron líneas OH de la atmósfera.

Para la reducción se usó el programa REDSPEC⁶ (Prato L., et al. 2002) que es un conjunto de aplicaciones programadas en IDL de forma específica para NIRSPEC, el principal inconveniente es que reduce un orden a la vez por lo que hay que repetir los mismos pasos para cada orden para cada estrella.

El programa REDSPEC desarrolla los siguientes pasos a la hora de reducir un orden:

- Eliminación de malos píxeles (opcional)
- Rectificación espacial (implícito)**
- Identificación de líneas espectrales (implícito)**
- Polinomio que relaciona longitud de onda con píxeles para cada orden (implícito)**
- Substracción de cielo (implícito)**
- Corrección por flatfield (implícito)**
- Eliminación de líneas telúricas (opcional)

⁶ <http://www2.keck.hawaii.edu/inst/nirspec/redspeg.html>

-Eliminación de efectos de fringing (opcional)

-División por el espectro de una estrella de calibración escalada por un cuerpo negro normalizado (opcional)

-Extracción espectral (implícito)

-Representación

De los pasos anteriores sólo se realizaron (para cada orden en cada estrella) aquellos resaltados en negrita, la razón de que algunos se descartaran es que debido a que nuestros datos provienen de distintos proyectos, no siempre se observaron estrellas de calibración o se produjeron máscaras de píxeles malos por lo que en vez de realizar TODOS los pasos en sólo algunas estrellas, se prefirió tratarlas a todas por igual, por último la eliminación de líneas telúricas no se realizó ya que se tienen bien identificadas en el rango que hemos estudiados y no era un paso necesario para la reducción.

Para proporcionar una idea de lo que ha supuesto el proceso de reducción, a continuación se explicarán los pasos realizados en cada uno de los órdenes:

a)- Recopilación de datos: el primer paso consiste en descargar del KOA todos los datos necesarios para cada estrella, es decir, recopilar los siguientes archivos:

- Espectros en las posiciones ABBA (sumamos los A y los B para ganar S/N)
- Archivos Flatfield (se combinan todos los disponibles y se normaliza el final)
- Archivos Darks (se combinan todos los disponibles)
- Archivos con los espectros de las lámparas (en algunos casos no se tomaron espectros de lámparas sino que se aprovechaban las líneas atmosféricas que aparecen en los espectros A y B)

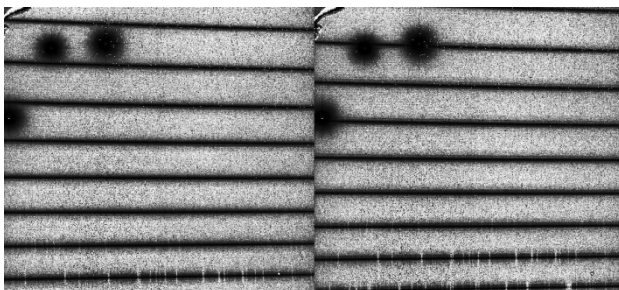


Figura 2. Espectro crudo tomado en las posiciones AB

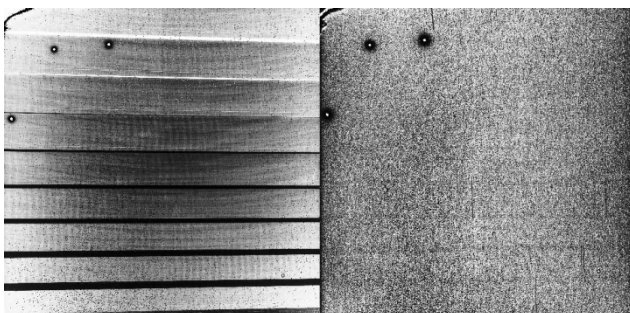


Figura 3. Imagen de flatfield (izquierda) y de dark (derecha).

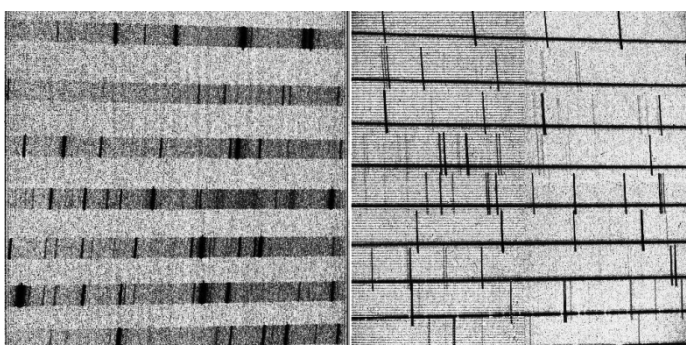


Figura 4. Imágenes de calibración de longitud de onda: imagen de lámparas (izquierda) y líneas OH de cielo impresas sobre el espectro crudo (derecha).

b)- Líneas de referencia para el orden espectral problema: el siguiente paso consiste en construir un fichero (.in) que contenga las líneas del arco (o las OH) en el rango espectral del orden que se pretende reducir, esto se realiza mediante el simulador de NIRSPEC (disponible en la página web del instrumento) mediante el cual se genera una imagen sobre cómo se verían las líneas sobre el detector aplicando los filtros y anchuras de rendija de cada objeto.

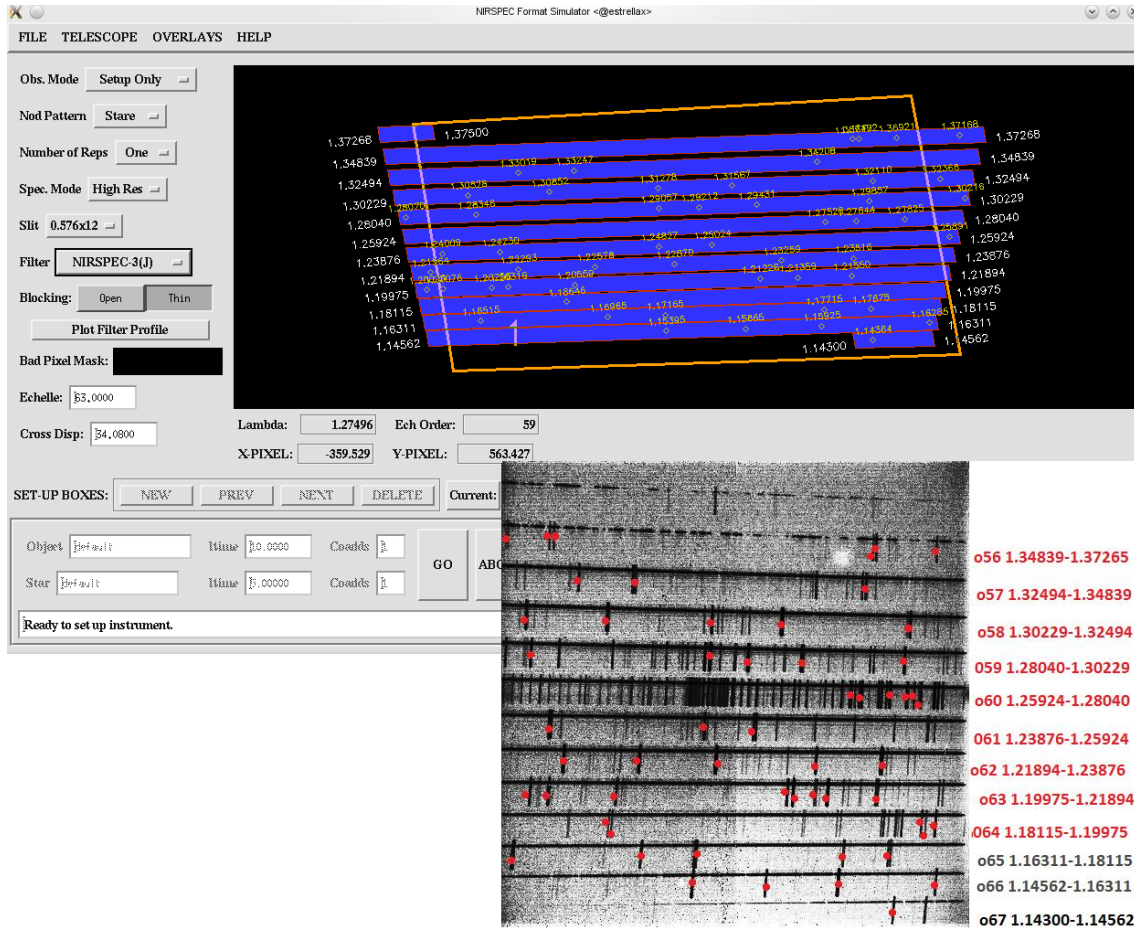


Figura 5. Mediante el simulador de NIRSPEC se pueden identificar las líneas de los arcos obtenidos en el telescopio, para ello basta aplicar los parámetros (filtro y anchura de rendija) con los cuales fue observado el objeto e indicar qué líneas queremos observar (Ar, Ne, Kr, Xe, OH o todas juntas). En la imagen tenemos el simulador de NIRSPEC en la zona superior y superpuesto en la zona inferior uno de los arcos empleados con las líneas identificadas.

C)- Uso de REDSPEC: con los datos anteriores descargamos el código de REDSPEC de la página web del instrumento.

Para iniciar el proceso de reducción descomprimos el fichero que descargamos, lanzamos la aplicación IDL y desde la consola escribimos PARFILE y con este comando se nos abre una ventana que nos permite indicarle al programa las rutas de los distintos ficheros que necesitaremos (espectro A, espectro B, arco, flatfield, dark y fichero con las líneas de referencia) como se muestra en la siguiente imagen.

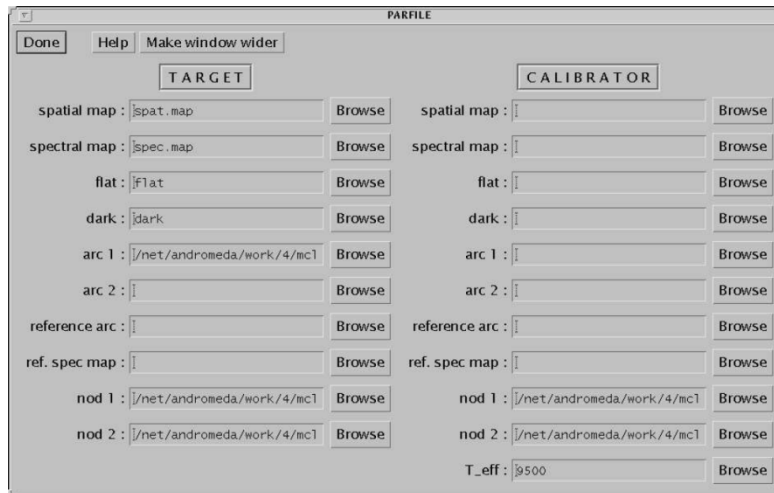


Figura 6. Imagen de la ventana que nos permite indicar donde se encuentran cada uno de los ficheros necesarios para la reducción de nuestro espectro problema, en nuestro caso sólo se rellenó la zona izquierda ya que la derecha está destinada a objetos para los que se haya observado una estrella de calibración y esto no estaba disponible para todos nuestros objetos.

Una vez que hemos indicado dónde se encuentra cada fichero, necesitamos seleccionar el orden que queremos reducir para realizar la rectificación espacial, para ello tenemos que escribir en la consola SPATMAP y con esto se nos abre una ventana con el arco que le indicamos en el paso anterior, así en esta nueva ventana (y ayudándonos del simulador de NIRSPEC) tenemos que identificar la zona donde cae nuestro orden problema, como se muestra en la siguiente imagen:

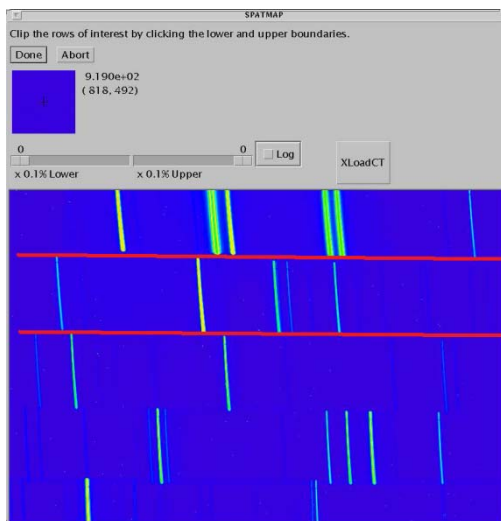


Figura 7. Selección del orden espectral problema mediante la aplicación SPATMAP (zona entre líneas rojas).

Una vez que se ha seleccionado la región de interés, el programa resta los espectros A y B y extrae la zona de interés, el siguiente paso es rectificar espacialmente el orden problema en caso de que estuviera torcido en el CCD, para ello se abre una nueva ventana en la que aparece el espectro A-B con los dos espectros, en este paso lo que interesa es modificar los parámetros presentes en la ventana hasta conseguir un buen polinomio que nos permita enderezar la imagen, el criterio empleado para obtener el polinomio fue que la suma cuadrática de errores fuera menor que 5 (en el manual de REDSPEC se indica que con 10 el ajuste ya es bueno), en las siguientes imágenes se presenta el proceso:

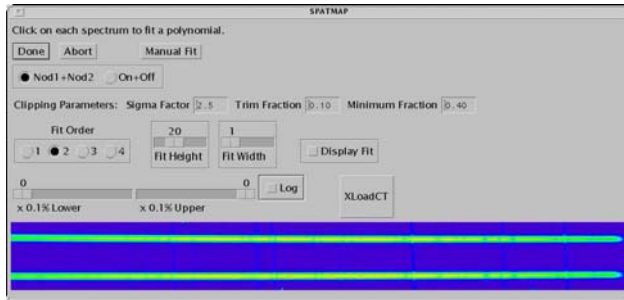


Figura 8. Ajuste de parámetros para conseguir un polinomio que enderece los espectros, en la imagen se muestran los espectros A y B del orden en cuestión.

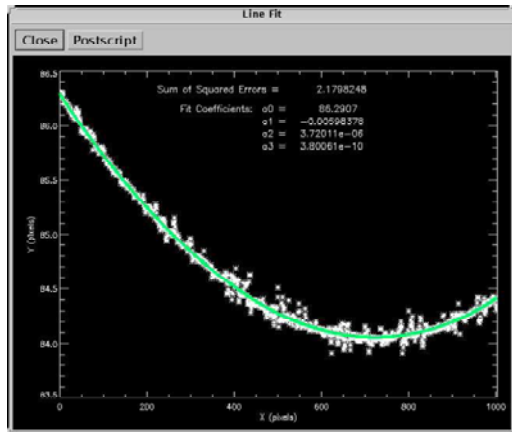


Figura 9. Polinomio que nos permite enderezar el espectro del orden problema.

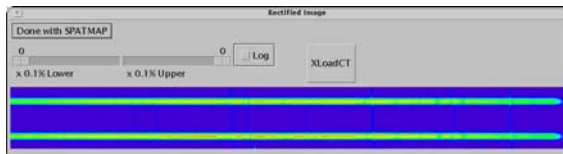


Figura 10. Espectros A y B rectificados.

Una vez que hemos rectificado espacialmente el orden problema, procedemos a realizar el calibrado en longitud de onda para ello escribimos en la consola SPECMAP y se nos abre una ventana con el trozo de arco que cortamos en el paso anterior, en este paso debemos identificar cada una de las líneas que aparecen en el arco y asignárselas a cada una de las líneas del fichero que creamos.

Nuevamente tenemos que jugar con los parámetros que aparecen para conseguir el mejor ajuste posible (ver Prato L., et al. 2002 para más información sobre los parámetros recomendados), el criterio empleado en este caso es que la suma cuadrática de errores al ajustar cada línea sea menor o igual que 0.1, en la siguiente imagen se muestra el proceso.



Figura 11. Calibrado en longitud de onda: identificamos en la imagen cada una de las líneas que aparecen listadas en la zona derecha de la imagen, en consola nos indica el error en el ajuste de cada línea, cuando se hayan identificado todas las líneas de ajuste se aplica el ajuste a los espectros A y B.

Por último, una vez que hemos rectificado espacialmente y aplicado la calibración en longitud de onda a los espectros A y B llegamos al paso más importante que es aplicar el algoritmo REDSPEC que revisa que ni los espectros ni las imágenes de flatfield estén saturados, extrae los espectros A y B los corrige de dark, flatfield y fringing y por último los combina dando como resultado un archivo ASCII con el espectro del orden extraído, a continuación se muestran los pasos que ocurren cuando se escribe REDSPEC en la consola de IDL.



Figura 12. Corrección y extracción del espectro del orden problema, en nuestro caso se marcaron todas las casilla de la imagen, excepto las referentes a “CALIBRATOR” ya que no había estrella de calibración disponible para todas las estrellas de nuestra muestra.

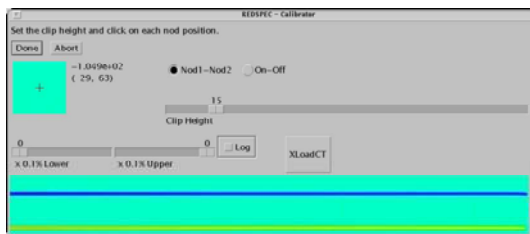


Figura 13. Extracción de los espectros A y B, en esta imagen se deben seleccionar los espectros que aparecen en la imagen procurando que el cursor quede en el centro de cada línea para que la extracción sea óptima y no se pierda luz.

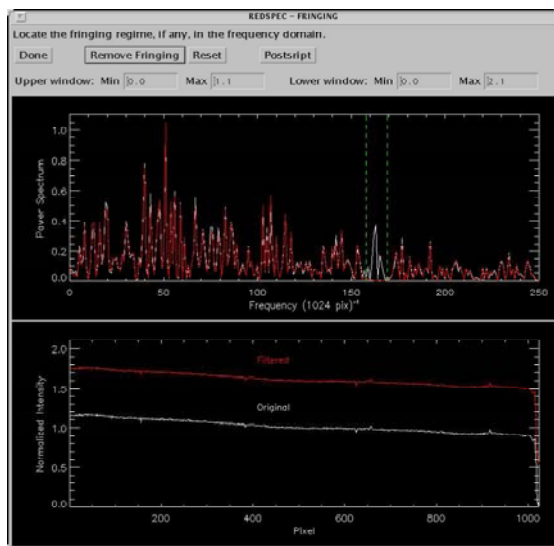


Figura 14. Corrección de fringing, una vez que se han seleccionado los dos espectros en la imagen anterior, el programa calcula si existen problemas de fringing, para ello aplica una transformada de Fourier intentando buscar algún patrón en la señal (gráfica superior), en caso de existir se selecciona para filtrar el espectro en esa frecuencia (gráfica inferior).

Así concluye el proceso de reducción para un orden, en algunos casos no se han podido extraer todos los órdenes para cada estrella por diversas razones como por ejemplo si no habían líneas suficientes o bien porque el ajuste de rectificación no era el adecuado o bien el orden estaba tan torcido que parte caía fuera del CCD y el programa no era capaz de ajustar el trozo que sí estaba en la imagen, en el siguiente apartado se indican qué órdenes se obtuvieron para cada estrella.

2.4 Órdenes conseguidos

En la siguiente tabla se muestran los órdenes que se consiguieron para cada una de las estrellas de esta muestra, así como información adicional como el filtro, la anchura de la rendija que se empleó en cada proyecto y la S/N conseguida.

Estrella	Filtro	Órdenes	S/N	Anchura Rendija
BS7368	N5-AO	46/47/48/49/50/51/52/53	77.00	0.027x2.26
HD195987	N5	45/46/47/48/49/50/51/52	57.00	0.288x24
G112-54	N5-AO	46/47/48/50/51/52/53	65.00	0.027x2.26
HD26794	N5	46/47/48/49/50/51/52/53	49.00	0.288x24
HD98800	N5-AO	46/47/48/49/50/51/52/53	69.00	0.027x2.26
GJ1069	N5-AO	46/47/48/49/50/51/52/53	44.00	0.027x2.26
G1763	N5-AO	46/47/48/49/50/51/52/53	85.00	0.027x2.26
LkCa3	N5	45/46/47	64.00	0.288x24
G15A	N5-AO	50/51/52	46.00	0.027x2.26
2MASSJ02515408+2227299	N5	45/46/47/51/52	38.00	0.288x24
G1402	N5-AO	45/46/47/48/49/50/51/52	63.00	0.027x2.26
GJ1227	N5	45/46/47/ 49/50/51/52/53	57.00	0.288x24
G1234A	N5-AO	45/46/47/48/49/50/51	57.00	0.027x2.26
HD134319B	N5	57/58/59/62/63/65/66	39.00	0.432x12
GJ1156	N3	57/58/59/62/63/65/66	91.00	0.432x12
G1905	N3	45/46/48/49/50	4.00	42x570
G1406	N5/N3	46/47/48/49/50/51/52/53/58/62/63/66	68/57	0.288x24/42x760

Tabla 3. Órdenes conseguidos para cada objeto después del proceso de reducción.

En la siguiente tabla se muestra información sobre los órdenes:

Orden	Filtro	Límite inferior (μm)	Límite superior (μm)
45	N5	1.67437	1.71200
46	N5	1.63836	1.67437
47	N5	1.60387	1.63836
48	N5	1.57080	1.60387
49	N5	1.53907	1.57080
50	N5	1.50859	1.53907
51	N5	1.47930	1.50859
52	N5	1.45112	1.47930
53	N5	1.43100	1.45112
56	N3	1.34839	1.37265
57	N3	1.32494	1.34839
58	N3	1.30229	1.32494
59	N3	1.28040	1.30229
60	N3	1.25924	1.28040
61	N3	1.23876	1.25924
62	N3	1.21894	1.23876
63	N3	1.19975	1.21894
64	N3	1.18115	1.19975
65	N3	1.16311	1.18115
66	N3	1.14562	1.16311
67	N3	1.14300	1.14562

Tabla 4. Información sobre los distintos órdenes espectrales que se emplearán en este trabajo, los límites inferiores y superiores han sido obtenidos mediante el simulador de NIRSPEC disponible en la página web del instrumento.

Los espectros conseguidos de cada estrella se representan al final de este trabajo en el apéndice A.

3. Análisis y Resultados:

3.1 Procedimiento:

Una vez que conseguí reducir todos los órdenes que fueron posibles para cada una de las estrellas problema (ver tabla 3, apartado 2.4 o apéndice A), el siguiente paso fue *para un determinado orden, representar todas las estrellas que tuviéramos disponibles ordenadas por tipo espectral para analizar la evolución de las líneas.*

Además en este trabajo tenemos dos estrellas K5V y dos estrellas M5V (en el mismo rango) los espectros de estas también se representaron para analizar posibles diferencias en algunas líneas que de existir podrían ser indicadores de actividad por ejemplo.

Una vez que se examinaron de forma visual estas representaciones se hizo una lista con las líneas más interesantes (las que parecían variar) y con esto se acudió a distintas bases de datos de líneas atómicas y moleculares como el atlas infrarrojo de Arturo (Hinkle, K., et al. 1995) o Lyubchik, Y., et al. 2004 para buscar los elementos que las originaban.

3.2 Candidatos:

En las siguientes tablas se muestran las líneas que presentan variación una vez se siguió el método descrito en el apartado anterior:

ORDEN 46	ORDEN 47	ORDEN 48	ORDEN 49	ORDEN 50	ORDEN 63
Fe 1.64912	Fe 1.61046	CO 1.57989	CN 1.54775	Fe 1.51472	CN 1.20917
CO 1.65079	Fe 1.61068	Fe 1.58157	S 1.54827	CN 1.51668	Si 1.21069
CO 1.65683	CO 1.61128	Fe 1.58495	Fe 1.55209	CN 1.51695	CN 1.21396
CO 1.65730	CO 1.61145	Fe 1.58630	Fe 1.55064	Ni 1.51777	Si 1.21430
V 1.65750	CO 1.61328	Cr 1.58645	Fe 1.55209	Ti 1.51908	CN 1.21587
CO 1.65821	Fe 1.61840	Fe 1.58336	Fe 1.55539	Fe 1.52082	CN 1.21878
Si 1.64394	CO 1.61057		Fe 1.56183	K 1.51672	
CO 1.64655	Fe 1.61068			Fe 1.51986	
CO 1.64926	Fe 1.62769			Fe 1.53531	
CO 1.65821	CO 1.62783				
ORDEN 58	ORDEN 57	ORDEN 65			
CN 1.31958	Fe 1.32954	CN 1.17731			
	Ti 1.33763	CN 1.17909			

Tabla 5. Líneas que presentan variación entre estrellas con un mismo tipo espectral

ORDEN 45	ORDEN 47	ORDEN 48	ORDEN 49	ORDEN 50
Si 1.68327	CN 1.61488	CO 1.58450	Fe 1.55384	Fe 1.51481
Fe 1.68377	CN 1.62849	CO 1.58471	OH 1.55397	OH 1.51499
CO 1.68466	CO 1.62867	CO 1.58817	Ti 1.55480	CN 1.51579
CO 1.68505	CN 1.62951	Mg 1.58905	CO 1.56035	CN 1.51616
Fe 1.68701	CO 1.61145	Si 1.58927	Fe 1.56085	Fe 1.51646
Ni 1.68718	Fe 1.61195	Fe 1.58973	Ni 1.56099	CN 1.51695
Fe 1.68745	Fe 1.61203	Fe 1.59008	Fe 1.56338	K 1.51672
CN 1.68731	Fe 1.61303	Fe 1.59169	Fe 1.56362	Fe 1.52082
OH 1.68764	CO 1.61328	CO 1.59185	CO 1.56457	Fe 1.52172
CO 1.68782	Ni 1.61405	CO 1.59238	CO 1.56535	Fe 1.52507
CO 1.68826	CN 1.61541	Fe 1.59338	CO 1.56598	Fe 1.52378
CO 1.68902	Fe 1.61609	Fe 1.59669	CN 1.54994	CN 1.52459
OH 1.68908	Fe 1.61763	CN 1.59715	CN 1.55021	Fe 1.52635
CO 1.68977	Fe 1.61824	CO 1.59922	Fe 1.55957	Mn 1.52666
OH 1.68997	Fe 1.61865	Fe 1.58234	Fe 1.55980	Fe 1.52673
OH 1.69033	Fe 1.61902	Fe 1.58271	CN 1.55269	CN 1.52797
CO 1.69064	OH 1.61945	Si 1.58379	Fe 1.55385	OH 1.52827
OH 1.69088	OH 1.61965	Fe 1.58394	OH 1.55397	OH 1.52852
Fe 1.69745	Fe 1.62892	Fe 1.58549	Ni 1.55448	Fe 1.52955
Ni 1.70008		Si 1.58927	Fe 1.55463	CN 1.51962
Ni 1.70057		Fe 1.59058	Ni 1.55596	Ni 1.51742
CO 1.70074		Fe 1.59249	Si 1.55620	Fe 1.49928
OH 1.70091		Fe 1.59254	V 1.55719	
CO 1.70109		Fe 1.59424	Fe 1.55753	
Fe 1.70157		Fe 1.59462	CO 1.55971	
CO 1.70196		Fe 1.59496	Fe 1.55980	
CO 1.70556		Si 1.59644	CO 1.56002	
		CN 1.59715	CO 1.56195	
ORDEN 46	ORDEN 58	Fe 1.59756	CN 1.56213	
CO 1.64256	Zn 1.30572	Fe 1.59850	OH 1.56309	
Fe 1.64714	Ca 1.30614	CO 1.58099	CN 1.56409	
Fe 1.64814	Fe 1.30657	Fe 1.58224	Fe 1.56571	
CO 1.65027	Ti 1.30808	Fe 1.58445	CO 1.56598	
Fe 1.65108	CN 1.30946	CN 1.58519	CN 1.56630	
CO 1.65160	Fe 1.31024	Fe 1.58571		
Fe 1.65300	Si 1.31056	Fe 1.58680		
Fe 1.65365	Fe 1.31116	Fe 1.58728		
Ca 1.64656	Ca 1.31385	CN 1.58869		
Ni 1.65939	Fe 1.31515	CO 1.59185		
CO 1.66111	Si 1.31563	Fe 1.59217		
Fe 1.66173	Ni 1.32161	V 1.59291		
		Fe 1.59496		
		CO 1.59525		
		Mg 1.59527		
		CO 1.59733		
		CO 1.59922		

Tabla 6. Líneas que presentan variación cuando se representan los órdenes en función del tipo espectral, en negrita se muestran aquellas en las que ya se han medido anchuras equivalentes en busca de posibles correlaciones.

Los órdenes 51, 52 y 53 estaban llenos de líneas atmosféricas y las líneas que parecían variar eran débiles.

3.2.1 ¿Causas de las variaciones?:

En las tablas 5 y 6 se muestran las líneas en las que se ha observado variación cuando se han comparado estrellas de un mismo tipo espectral o cuando se representan los espectros en función del tipo espectral respectivamente, en el segundo caso (tabla 6), *lo natural sería pensar que las variaciones se deben a que tenemos líneas sensibles a T_{eff} aunque no hay que descartar que se deban a la $g_{superficial}$.*

Sin embargo, para estar seguros de que se trata de una línea sensible a la gravedad, habría que recolectar espectros de estrellas subgigantes y gigantes (IV y III) para hacer una comparación más fiable.

También podría tratarse de líneas con cierta sensibilidad a la actividad estelar por lo que en el peor de los casos tendríamos líneas sensibles a una combinación de T_{eff} , $g_{superficial}$ y actividad.

Pasando al primer caso (tabla 5) en el que tenemos líneas que varían en estrellas de un mismo tipo espectral (he usado las enanas K5 y M5 para recopilar estas líneas, también tenemos dos enanas M4V y dos M4.5V pero no se encontraron diferencias apreciables en estas), en este caso, de confirmarse que son líneas que varían (sólo he empleado dos pares de estrellas para seleccionarlas) tendríamos que se trata de líneas sensibles a la actividad (campo magnético), la confirmación de estas sólo se puede obtener recopilando más espectros de estrellas del mismo tipo espectral junto con información adicional como espectros en el óptico/infrarrojo-óptico para comparar el comportamiento de estas líneas con el de indicadores clásicos como H&K de CaII, H α o el triplete infrarrojo del calcio.

Por ejemplo, en la página web del KOA se han encontrado los espectros ópticos de 2 de estas 4 enanas, se trata de espectros obtenidos con HIRES y reducidos de forma automática por el software del observatorio, obviamente no son espectros para hacer ciencia pero son útiles para tener una idea de cómo es la estrella, en la siguiente imagen se muestra la línea H α para las enanas HD98800 (K5V) y GJ1156 (M5V), puede verse que poseen distinto grado de actividad lo que apoya nuestras sospechas sobre la explicación de las líneas que varían en la tabla 5.

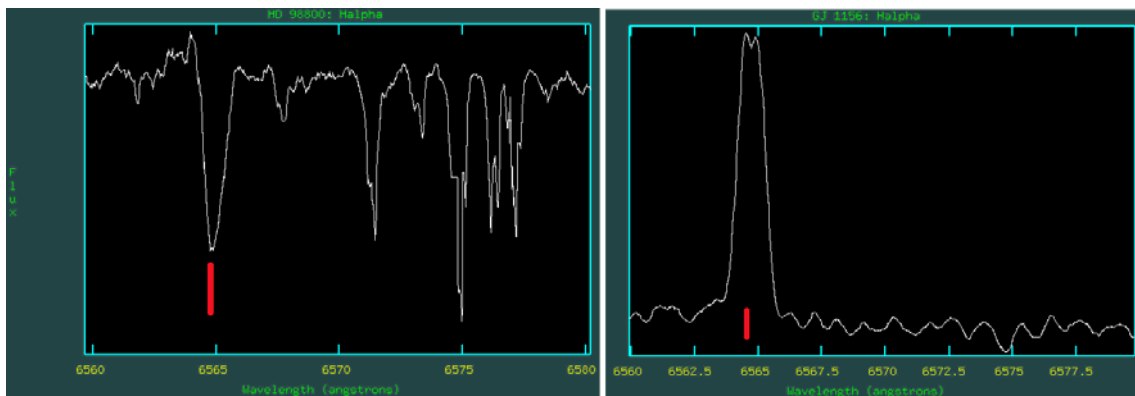


Figura 15. H α para HD98800 (K5V, izquierda) y GJ1156 (M5V, derecha).

También en la siguiente figura se muestra el triplete infrarrojo del calcio para la estrella HD98800, podemos ver en la figura como el triplete presenta un perfil de absorción con emisión central.

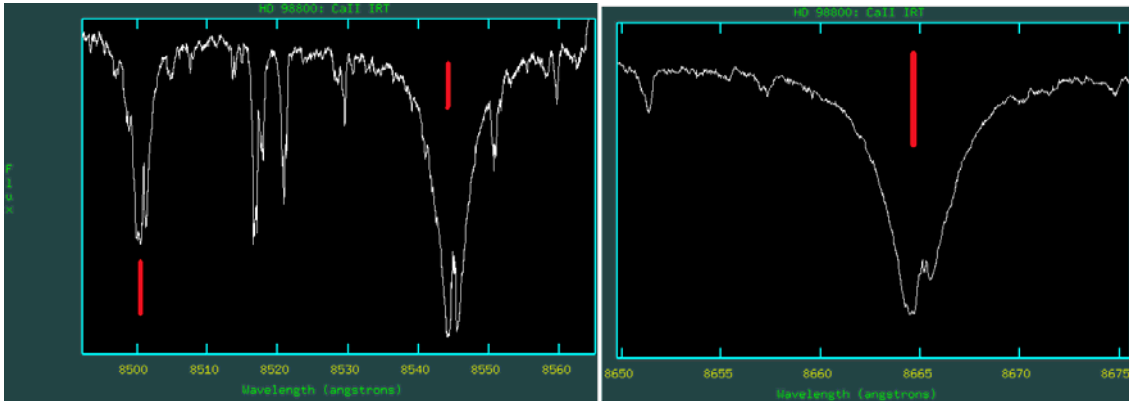


Figura 16. Triplete infrarrojo del Ca II para HD98800 (K5V).

Otra posible explicación a la variabilidad de las líneas de la tabla 5 es que se traten de líneas telúricas, sin embargo, se ha hecho un cruce (con un margen muy amplio) entre las líneas de la tabla 6 y algunas bases de datos de líneas telúricas (Rousselot et al. 2000) y no se han encontrado coincidencias, un ejemplo de estas variaciones dentro de un mismo tipo espectral se muestra en la siguiente imagen:

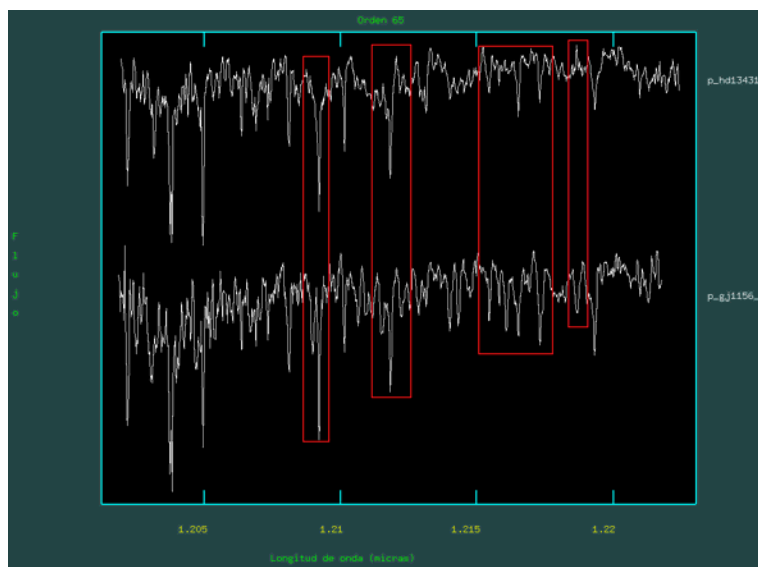


Figura 17. Ejemplo de las variaciones que pueden aparecer en algunas líneas en estrellas del mismo tipo espectral, el espectro superior corresponde a HD134319B y el inferior a GJ1156 ambas estrellas M5V (orden 65).

3.3 Variaciones de las líneas con el tipo espectral:

En las siguientes imágenes se muestran algunos ejemplos de la evolución de los espectros ordenados por tipo espectral:

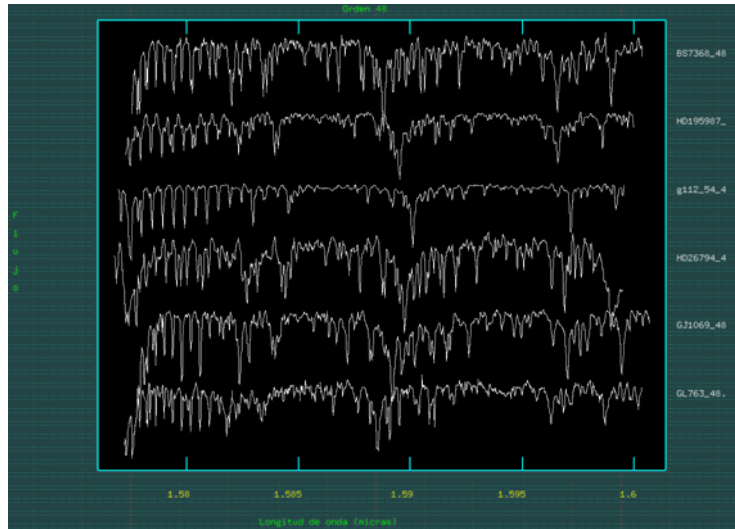


Figura 18. Evolución de las líneas ordenadas por temperaturas decrecientes (orden 48), en algunos espectros se nota la diferencia de S/N de nuestros objetos.

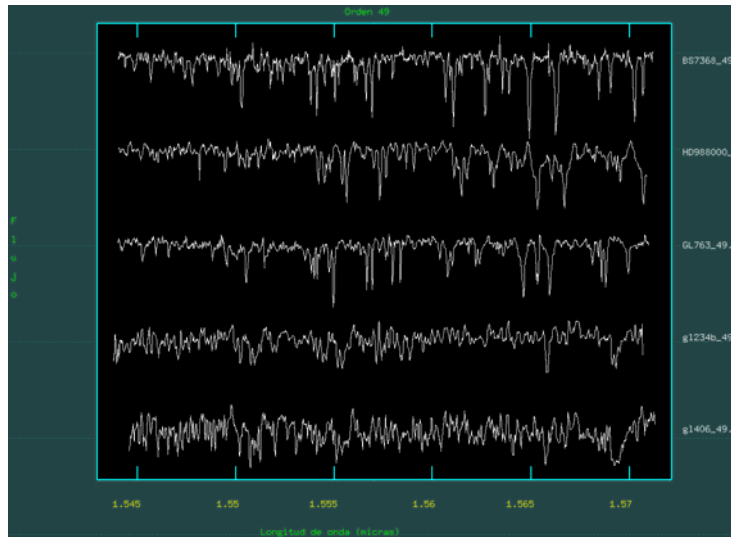


Figura 19. Evolución de las líneas ordenadas por temperaturas decrecientes (orden 49).

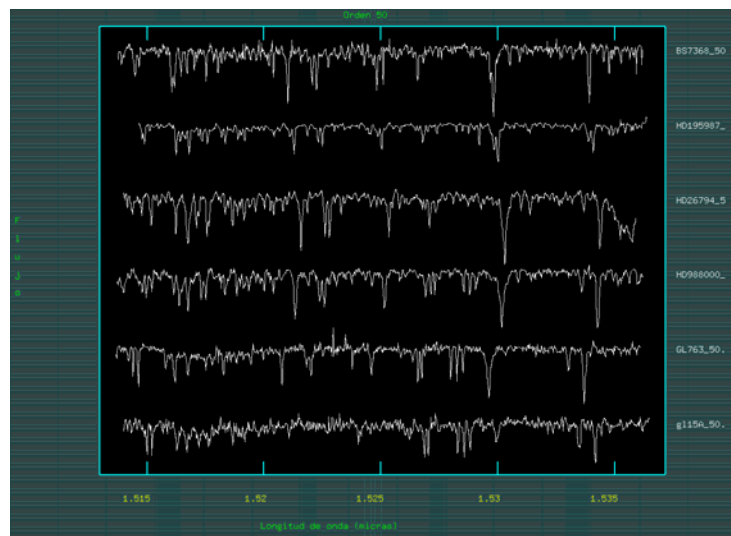


Figura 20. Evolución de las líneas ordenadas por temperaturas decrecientes (orden 50).

3.3.1 Análisis de algunas líneas:

De momento se ha hecho un análisis de 21 de las 225 líneas de las tablas 5 y 6, para ello se han medido anchuras equivalentes y se han representado frente al logaritmo de la temperatura efectiva (los datos de la T_{eff} según el tipo espectral han sido sacados de Fundamental Astronomy, Kartunen et al. 2007), con estos datos se ha buscado correlación calculando el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) y haciendo un contraste de hipótesis clásico y además mediante las pruebas no paramétricas de Spearman (r_s) y de Kendall (τ), el cálculo de dichos parámetros se puede encontrar en cualquier libro de estadística (por ejemplo en la bibliografía de la asignatura “Análisis de Datos y Estadística Avanzada” del máster).

En las siguientes tablas se muestran los resultados de dichas pruebas para cada línea así como algunas figuras:

Línea	r	Δr	r^2	r_s	τ
CN_1.56630	0,852	0,122	0,727	0,943	0,867
CO_1.59185	-0,839	0,210	0,703	-0,500	-0,333
CO_1.64256	-0,840	0,120	0,705	-0,848	-0,667
CO_1.65027	0,239	0,422	0,057	0,414	0,271
CO_1.68466	-0,585	0,380	0,342	-0,400	-0,333
Fe_1.49928	0,919	0,063	0,845	0,929	0,810
Fe_1.58549	-0,710	0,351	0,504	-0,500	-0,333
Fe_1.59249	-0,854	0,192	0,729	-0,500	-0,333
Fe_1.59254	-0,946	0,075	0,894	-0,500	-0,333
Fe_1.59338	-0,870	0,172	0,757	-0,500	-0,333
Fe_1.59669	-0,738	0,322	0,544	-0,500	-0,333
Fe_1.61303	0,953	0,035	0,908	0,970	0,901
Fe_1.62892	0,549	0,404	0,301	0,800	0,667
Fe_1.66173	-0,852	0,194	0,726	-1,000	-1,000
Fe_1.68377	0,758	0,213	0,574	0,200	0,200
Fe_1.68701	-0,697	0,297	0,485	-0,800	-0,667
Fe_1.68745	-0,744	0,258	0,553	-0,800	-0,667
Ni_1.61405	-0,706	0,190	0,498	-0,762	-0,571
Ni_1.68718	-0,697	0,297	0,485	-0,800	-0,667
Si_1.59644	0,404	0,265	0,163	0,323	0,220
V_1.59291	-0,878	0,162	0,771	-0,500	-0,333

Tabla 5. Coeficientes estadísticos medidos para 21 de las 225 líneas que se proponen en este trabajo, los coeficientes r y r_s poseen un significado similar con la diferencia de que en el caso del primero se está asumiendo que la población sigue una distribución normal mientras que en el segundo caso no, por lo que nos da más seguridad ya que a priori no sabemos si la población es normal o no, cuanto más próximos a ± 1 mayor correlación existe, en este sentido de gran utilidad es el parámetro r^2 que nos indica en el caso clásico, cual es la fracción de datos que se pueden explicar por el ajuste a una recta. Por último el parámetro τ posee una explicación menos clara, se basa en comparar rangos en las variables indicando la diferencia de la probabilidad de que las dos variables estén en el mismo orden menos la probabilidad de que estén en un orden diferente, cuanto más próximo a ± 1 mayor correlación entre los datos de la muestra.

Línea	¿Se acepta H_0 en el caso de Pearson?*	¿Se acepta H_0 en el caso de Spearman?*	¿Se acepta H_0 en el caso de Kendall?*	¿Correlación?
CN_1.56630	No	No	No	Si
CO_1.59185	Si	Si	Si	No
CO_1.64256	No	No	No	Si
CO_1.65027	Si	Si	Si	No
CO_1.68466	Si	Si	Si	No
Fe_1.49928	No	No	No	Si
Fe_1.58549	Si	Si	Si	No
Fe_1.59249	Si	Si	Si	No
Fe_1.59254	Si	Si	Si	No
Fe_1.59338	Si	Si	Si	No
Fe_1.59669	Si	Si	Si	No
Fe_1.61303	No	No	No	Si
Fe_1.62892	Si	Si	Si	No
Fe_1.66173	Si	No	Si	No
Fe_1.68377	Si	Si	Si	No
Fe_1.68701	Si	Si	Si	No
Fe_1.68745	Si	Si	Si	No
Ni_1.61405	No	No	No	Si
Ni_1.68718	Si	Si	Si	No
Si_1.59644	Si	Si	Si	No
V_1.59291	Si	Si	Si	No

Tabla 6.*En todos los casos la hipótesis nula H_0 corresponde al caso en el que no haya correlación. La decisión final sobre si existe o no correlación (columna 5) se toma teniendo en cuenta que las pruebas no paramétricas (3º y 4º columna) son más potentes que la prueba clásica de Fisher con el parámetro de Pearson (columna 2) y no se decidió en ningún caso sobre la existencia de correlación o no sin antes examinar una representación gráfica de los datos. En la primera columna se han puesto en negrita las líneas que superaron las pruebas de correlación.

En las tablas 7 y 8 se muestran los resultados de los análisis estadísticos en busca de correlación.

En particular se investigó la línea de Si $\lambda 1.59644 \mu m$ (figura 23, derecha) la cual ha aparecido recientemente en un artículo de Nguyen Le y colaboradores (agosto de 2011) en el cual se propone como indicador de tipo espectral en gigantes, en nuestro caso se intentó hacer con enanas pero con nuestros datos no encontramos correlación como puede verse en los coeficientes recopilados en las tablas anteriores y en las siguientes figuras:

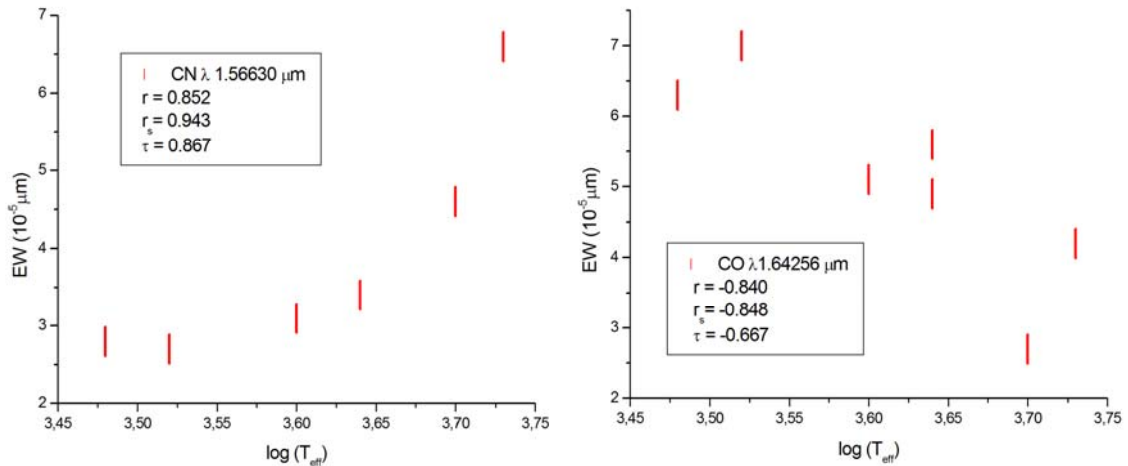


Figura 21. Anchura equivalente (micras) frente al logaritmo de la temperatura efectiva para las líneas de CN $\lambda 1.56630 \mu\text{m}$ (izquierda) y CO $\lambda 1.64256 \mu\text{m}$ (derecha), los valores de los coeficientes de Pearson, Spearman y Kendall se han escrito también.

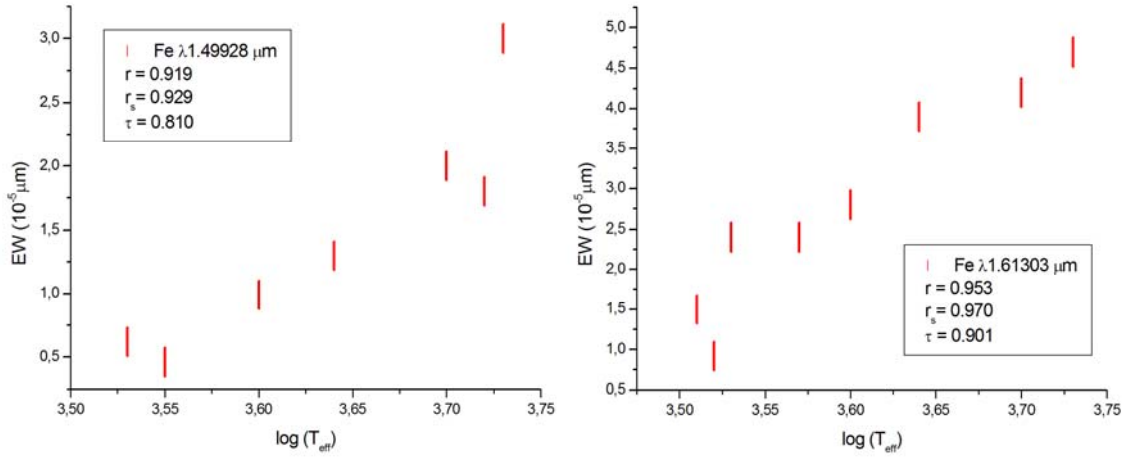


Figura 22. Anchura equivalente (micras) frente al logaritmo de la temperatura efectiva para las líneas de Fe $\lambda 1.61303 \mu\text{m}$ (derecha) y Fe $\lambda 1.49928 \mu\text{m}$ (izquierda), los valores de los coeficientes de Pearson, Spearman y Kendall se han escrito también.

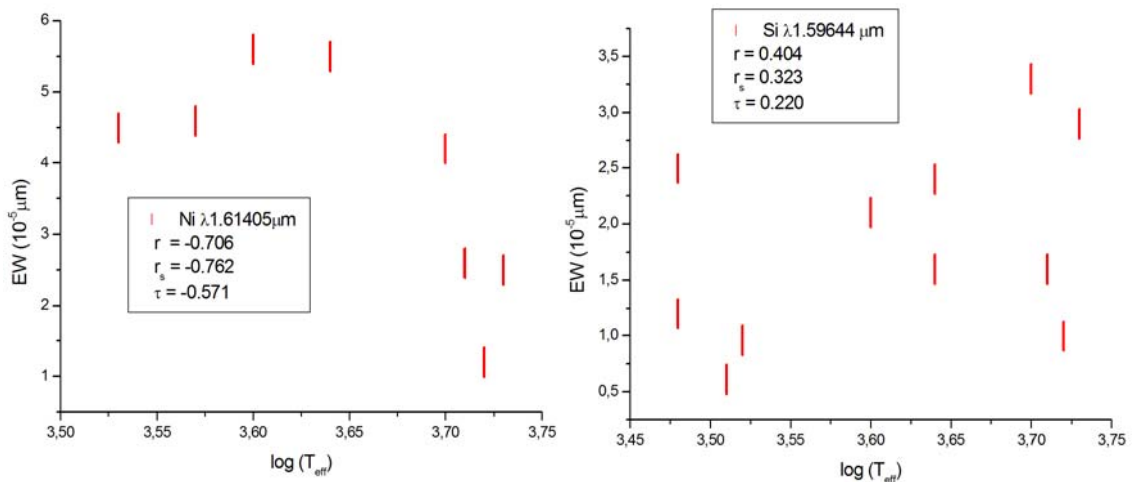


Figura 23. Anchura equivalente (micras) frente al logaritmo de la temperatura efectiva para las líneas de Ni $\lambda 1.61405 \mu\text{m}$ (izquierda) y Si $\lambda 1.59644 \mu\text{m}$ (derecha), los valores de los coeficientes de Pearson, Spearman y Kendall se han escrito también.

4. Conclusiones, Principal Aporte del Estudiante y Trabajo Futuro:

En este trabajo de fin de máster de 18 créditos, he buscado espectros de alta resolución en el NIR de estrellas frías en las bases de datos disponibles actualmente.

Se encontraron 17 estrellas observadas con NIRSPEC en el rango 1.2-1.8 μm , los espectros fueron reducidos y se procedió a su análisis.

Como resultado y aporte se obtuvieron 225 líneas (mayoritariamente atómicas, aunque también de moléculas como CO y CN, tablas 5 y 6) que son fuertes **candidatos a indicadores de actividad, gravedad superficial o temperatura efectiva**, de momento se han medido anchuras equivalentes de algunas de estas líneas para buscar correlaciones, aunque hace falta una muestra mayor de estrellas o bien espectros en otras longitudes de onda (óptico para aprovechar los indicadores clásicos) para confirmar o descartar la validez de las líneas, además hay que indicar que de las 225 líneas que propongo como candidatas sólo hay una en la bibliografía (*Si $\lambda 1.59644 \mu\text{m}$ propuesta como identificador de estrellas gigantes en un artículo de agosto de 2011, Nguyen Le et al. 2011*).

Hasta ahora se han estudiado 21 de estas líneas para estudiar si son sensibles a la T_{eff} , para ello se ha buscado correlación entre anchura equivalente y temperatura efectiva mediante el método clásico de Pearson y los métodos no paramétricos de Spearman y Kendall y **como resultado se ha encontrado que 5 de estas líneas son sensibles al tipo espectral** mientras que en los otros casos alguno de los test mencionados anteriormente fallaba por lo que para terminar de descartarlas o no se necesitan más datos o acudir a otros rangos espectrales.

Este no es un trabajo cerrado, sino que es sólo el principio de un trabajo más profundo debido a la gran cantidad de datos existente en el KOA, el cual **servirá de preparación para los estudios que se podrán hacer dentro de poco con espectrógrafos en el NIR como CARMENES y otros que vendrán.**

Para dar una idea de la riqueza de datos del KOA, puedo decir que dentro de la búsqueda de espectros en el NIR que realicé encontré 14 enanas M observadas con el mismo filtro y la misma configuración en el rango 1.8-2.63 μm , rango que se sale del propósito de este trabajo pero que analizaré en el futuro por mi cuenta o bien que podrían suponer el proyecto de fin de máster de un nuevo alumno o bien un trabajo académicamente dirigido en la licenciatura de física de la UCM.

Además en el mismo KOA se encontraron 143 enanas G, K y M (las enanas mencionadas anteriormente y las de este trabajo están contenidas en estas 143) observadas con HIRES (óptico, $R \sim 80000$) cuyos espectros han sido reducidos de forma automática por el software propio del observatorio, aunque en este caso hay que tener cuidado porque he detectado que no siempre salen bien reducidos y lo correcto sería reducir esos espectros de forma manual, una vez hecho esto la aplicación directa con las enanas observadas en el NIR o las otras 14 que se han mencionado sería inmediata para analizar el comportamiento de las líneas candidatas de este trabajo.

5. Agradecimientos:

This research has made use of the Keck Observatory Archive (KOA), which is operated by the W. M. Keck Observatory and the NASA Exoplanet Science Institute (NExSci), under contract with the National Aeronautics and Space Administration

6. Bibliografía:

Hinkle, K. et al., 1995, PASP, 107, 1042
Kartunen, H. et al., “Fundamental Astronomy”, 2007, 5° ed. Springer-Verlag
Lyubchik, Y. et al., 2004, A&A, 416, 655
McLean I.S., et al. 1998, SPIE, 3354, 566
Meyer, M.R., et al., 1998, ApJ, 508, 397
Nguyen Le et al., 2011, arXiv:1108.1499v2 [astro-ph.SR]
Pickles, A.J., et al., 1998, PASP, 110, 863
Prato, L., et al., 2002, manual de REDSPEC
Quirrenbach, A., Amado, P.J., Mandel, H., Caballero, J.A., et al. 2010, SPIE, 7735, 773513
Rayner, J.T., et al., 2009, ApJS, 185, 289
Rousselot, P., et al., 2000, A&A, 354, 1134
Sharon, C., et al., 2010, AJ, 139, 646
Wallace, L., Hinkle, K., 1997, ApJS, 111, 445

Web de REDSPEC: <http://www2.keck.hawaii.edu/inst/nirspec/redspec.html>
Web del KOA: <https://koa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/KOA/nph-KOAllogin>
Web de NIRSPEC: <http://www2.keck.hawaii.edu/inst/nirspec/>
Web de CARMENES: <http://carmenes.caha.es/>
Web de HIRES: <http://www2.keck.hawaii.edu/inst/hires/>
Web de CRIRES: <http://www.eso.org/~rsiebenm/crides/>

Apéndice A: Espectros conseguidos para cada estrella

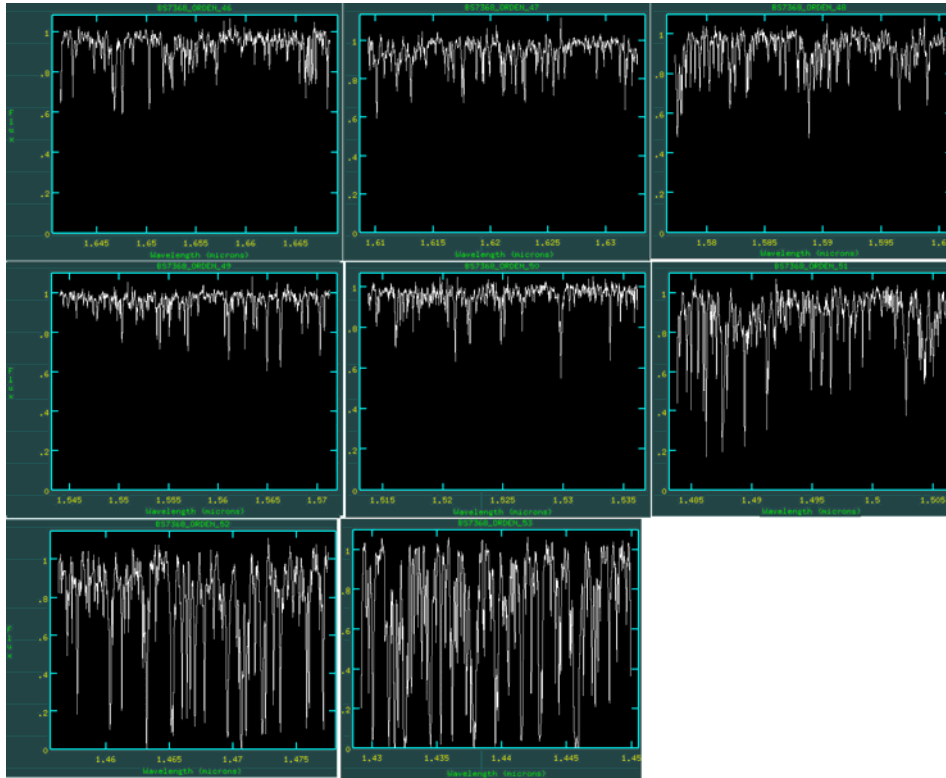


Figura 1. Órdenes obtenidos para BS7368 (G8V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 46, 47 y 48 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 52 y 53.

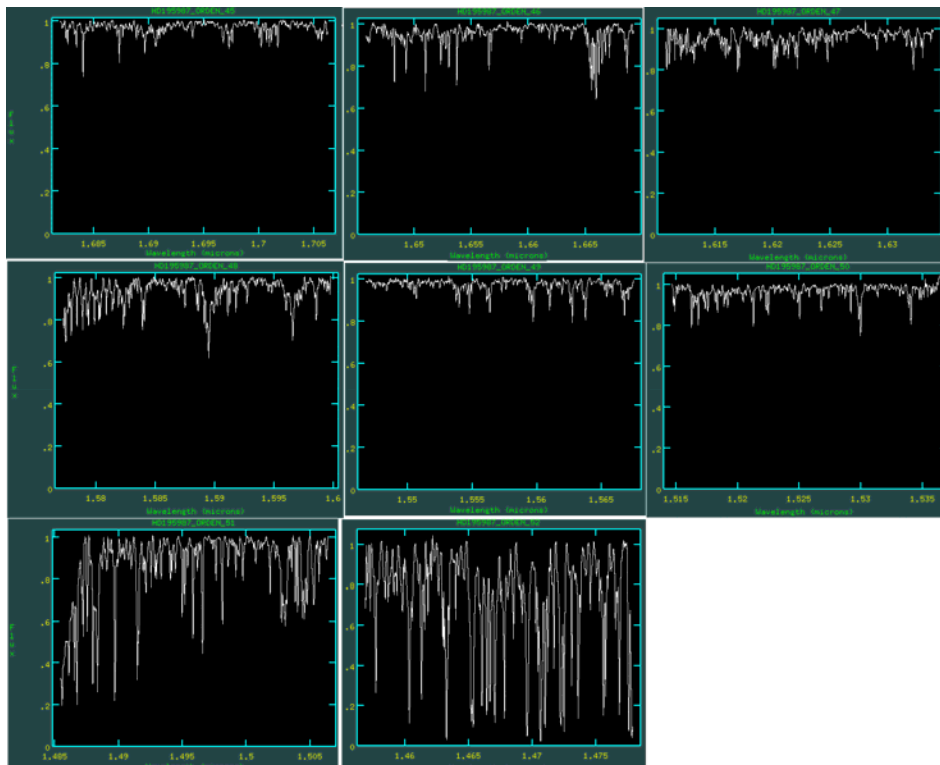


Figura 2. Órdenes obtenidos para HD195987 (G9V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 45, 46 y 47 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 48, 49 y 50 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 53 y 52.

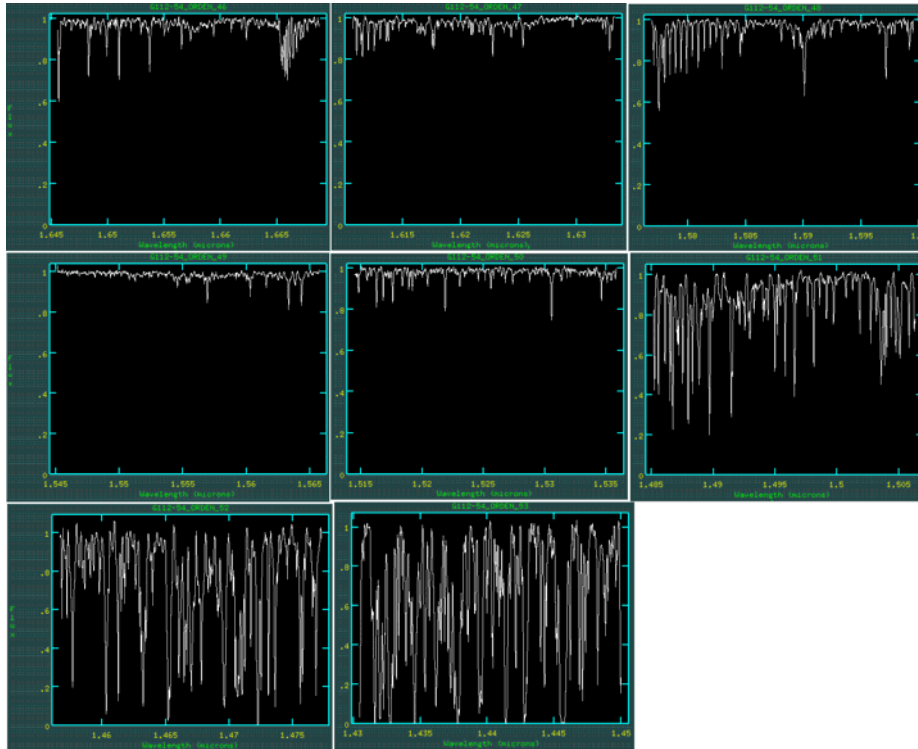


Figura 3. Órdenes obtenidos para G112-54 (K0V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 46, 47 y 48 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 52 y 53.

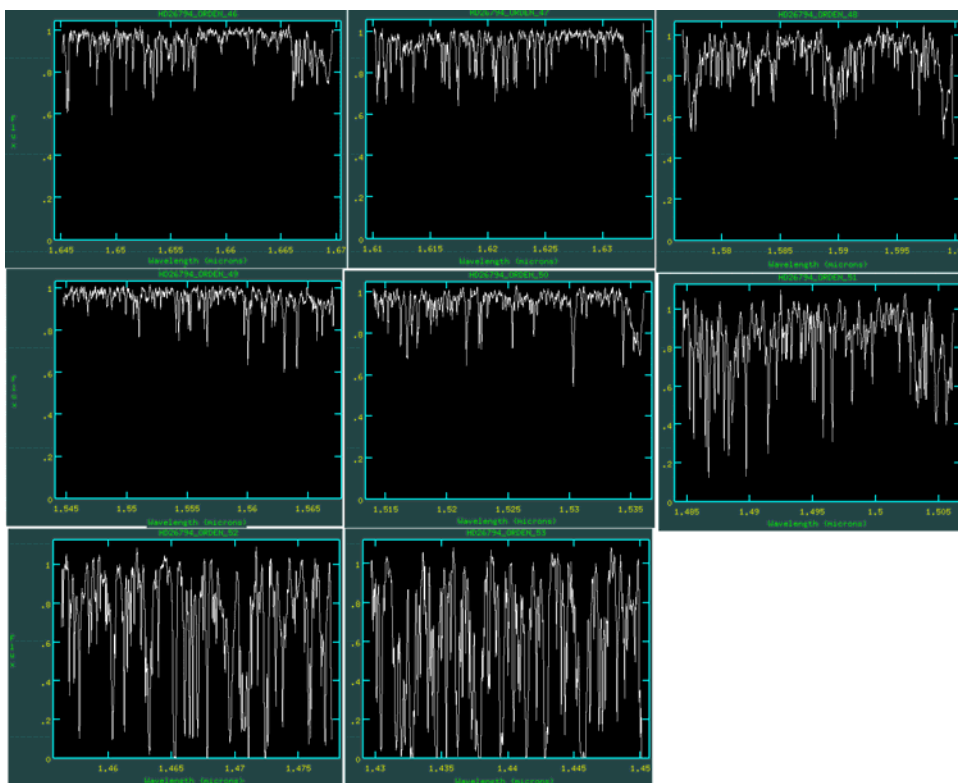


Figura 4. Órdenes obtenidos para HD26794 (K3V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 46, 47 y 48 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 52 y 53.

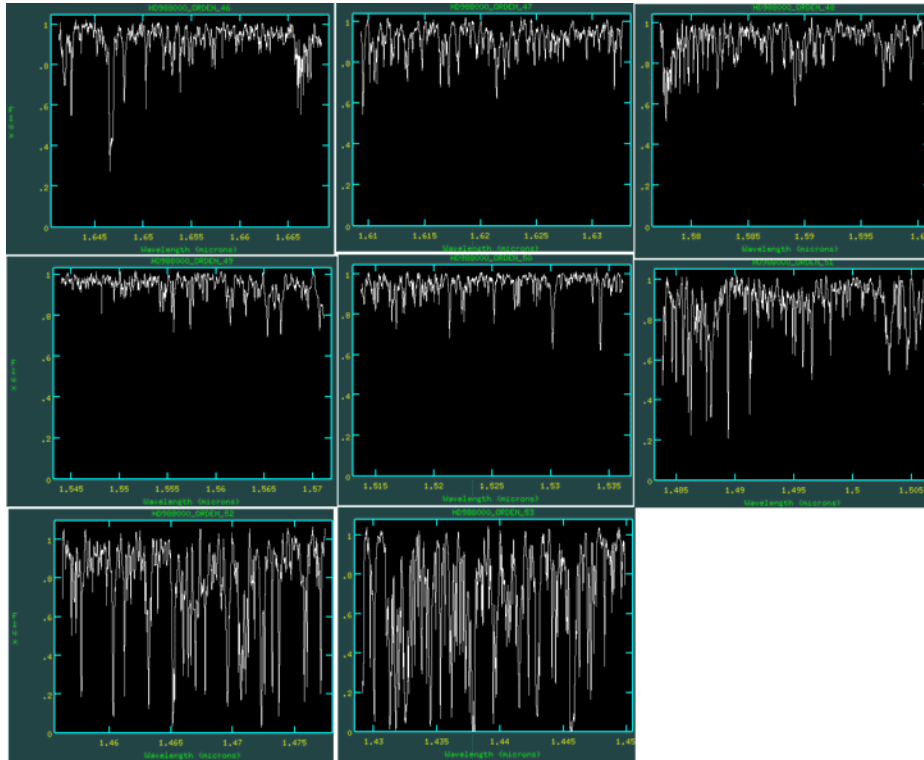


Figura 5. Órdenes obtenidos para HD98800 (K5V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 46, 47 y 48 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 52 y 53.

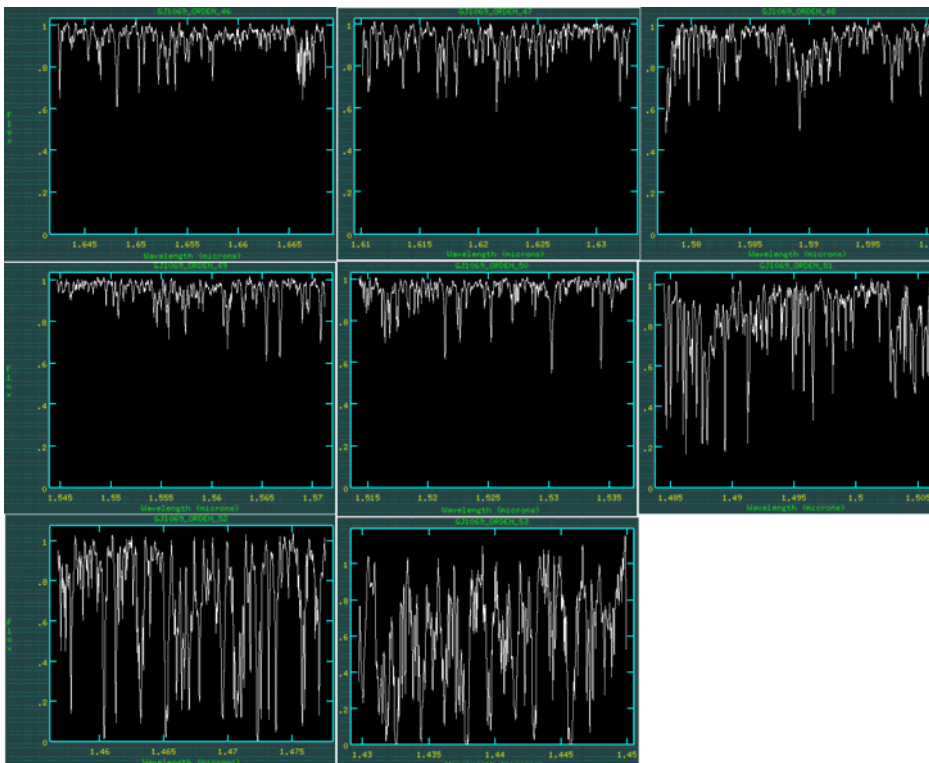


Figura 6. Órdenes obtenidos para GJ1069 (K5V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 46, 47 y 48 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 52 y 53.

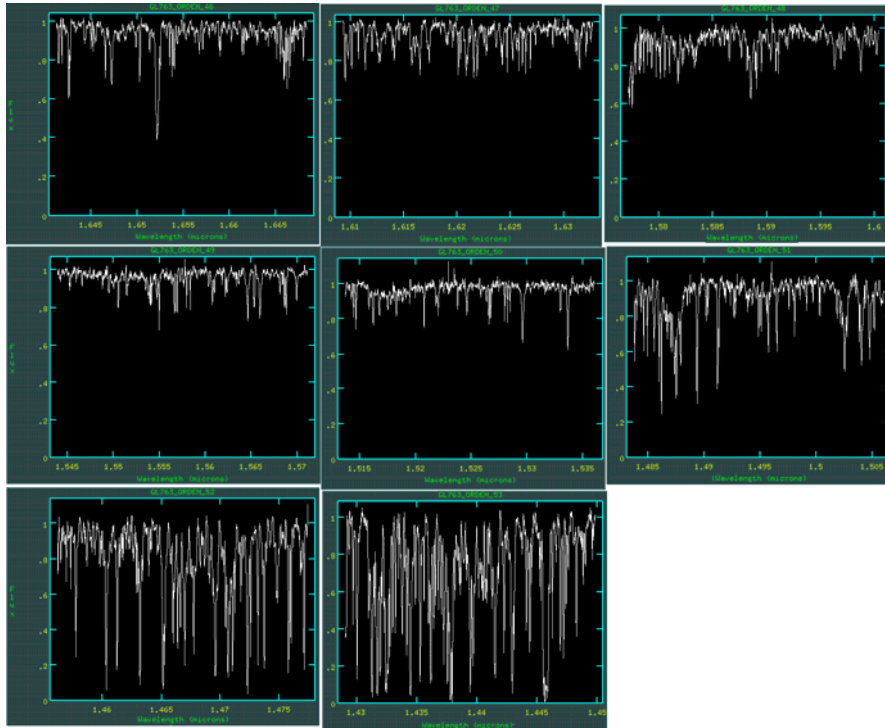


Figura 7. Órdenes obtenidos para Gl763 (K8V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 46, 47 y 48 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 52 y 53.

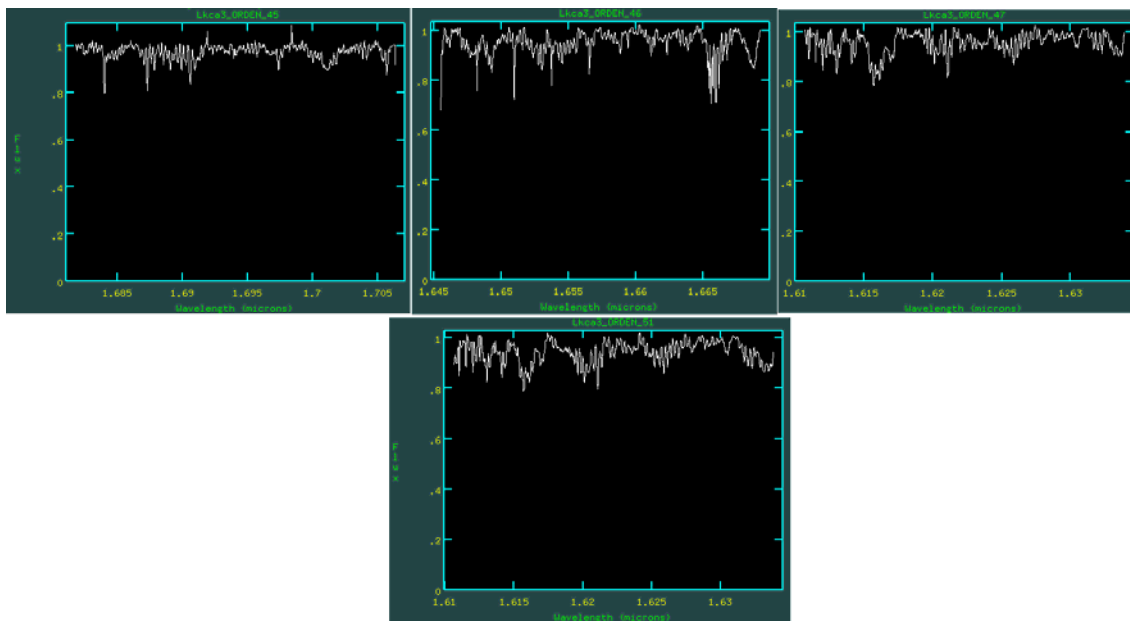


Figura 8. Órdenes obtenidos para LkCa3 (M1V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 45, 46 y 47 (de izquierda a derecha), la imagen inferior corresponde al orden 51. Los demás órdenes no se pudieron obtener debido a problemas con la rectificación espacial.

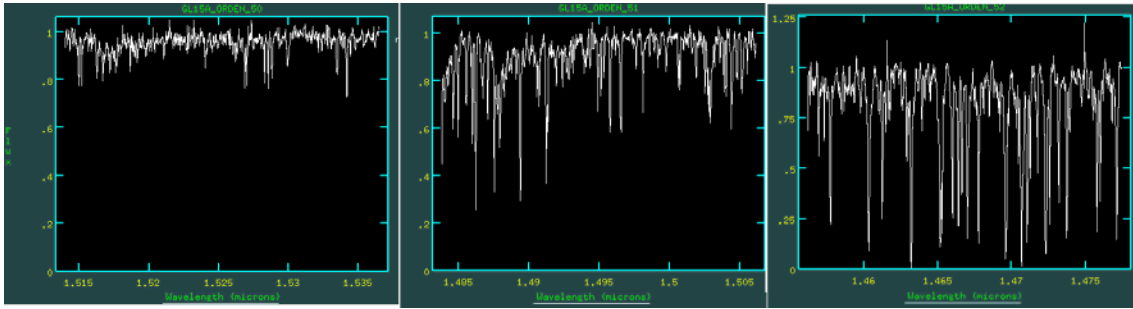


Figura 9. Órdenes obtenidos para G115A (M2V), órdenes 50, 51 y 52 (de izquierda a derecha). Los demás órdenes no se pudieron obtener debido a problemas con la rectificación espacial.

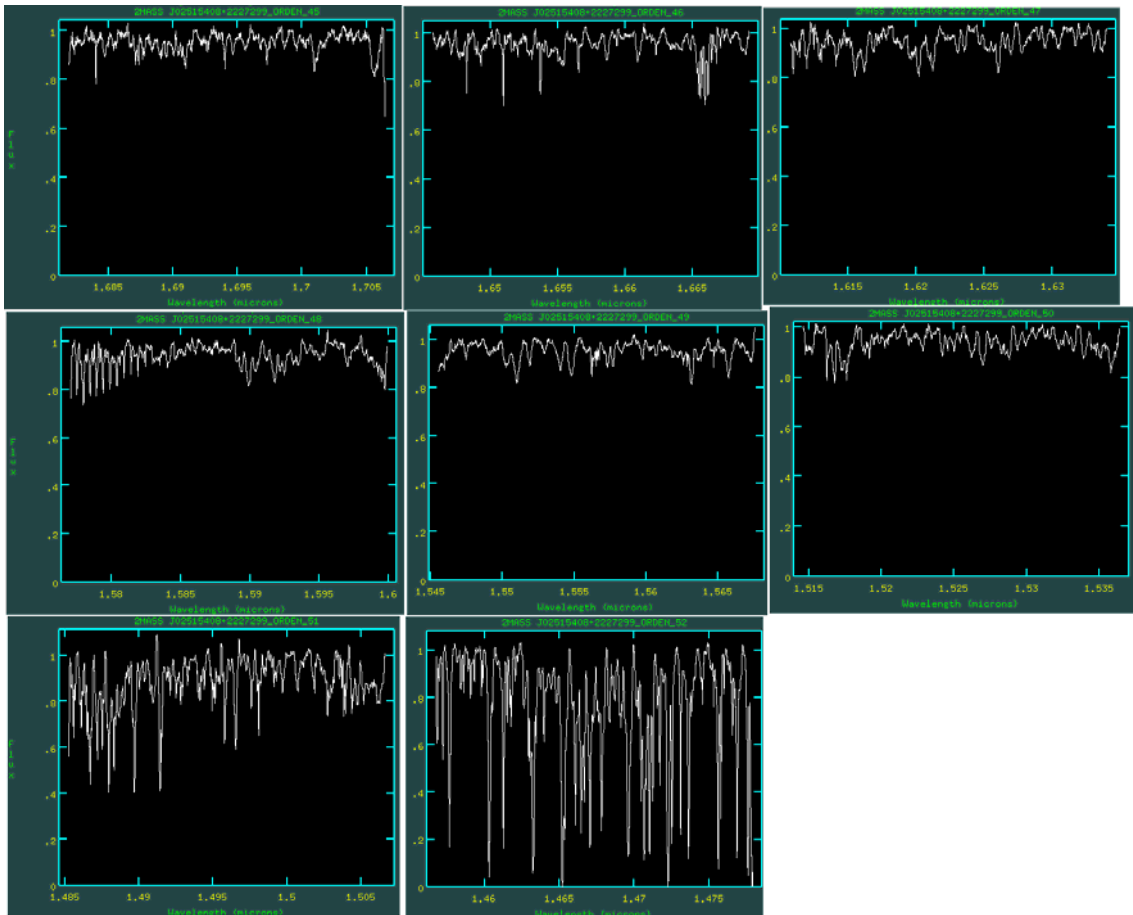


Figura 10. Órdenes obtenidos para 2MASSJ02515408+2227299 (M4V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 45, 46 y 47 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 48, 49 y 50 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 51 y 52.

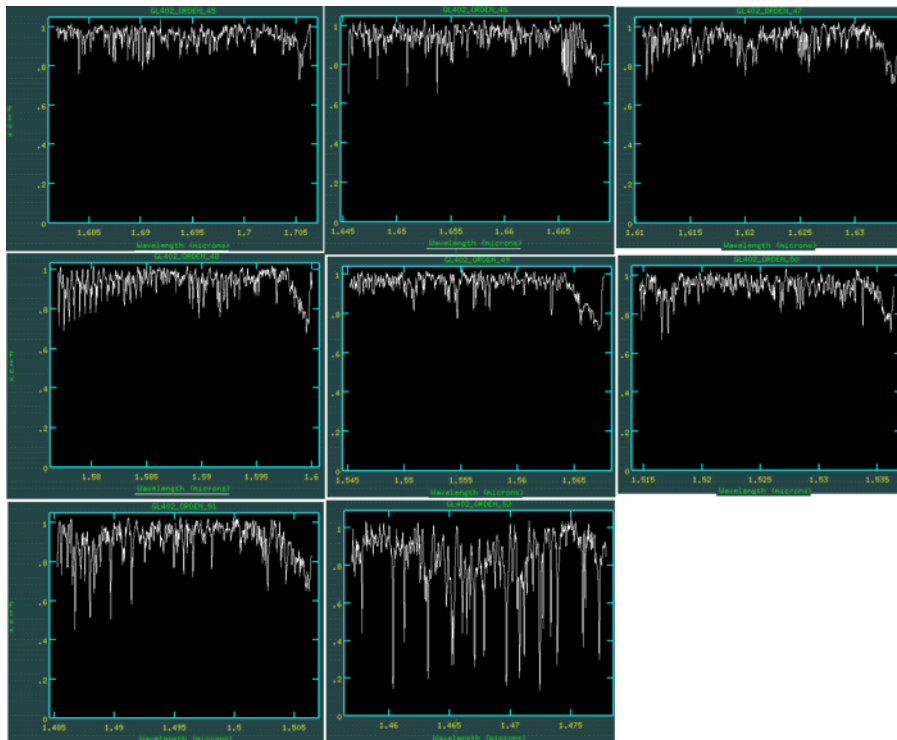


Figura 11. Órdenes obtenidos para GJ402 (M4V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 45, 46 y 47 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 48, 49 y 50 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 51 y 52.

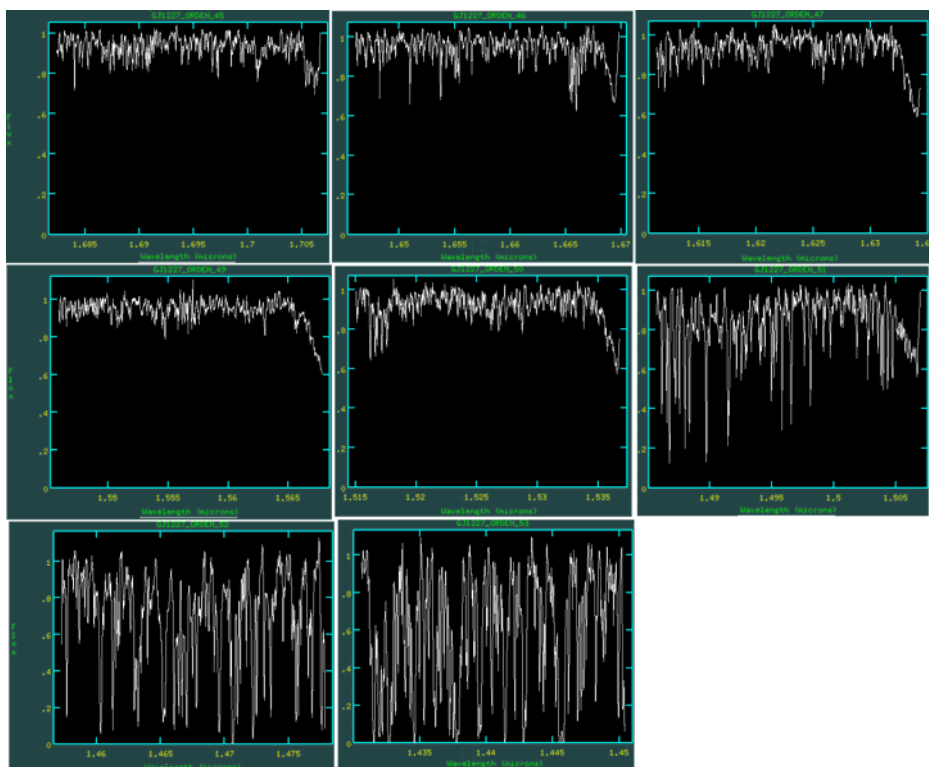


Figura 12. Órdenes obtenidos para GJ1227 (M4.5V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 45, 46 y 47 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha) y las dos imágenes inferiores (de izquierda a derecha) son los órdenes 52 y 53.

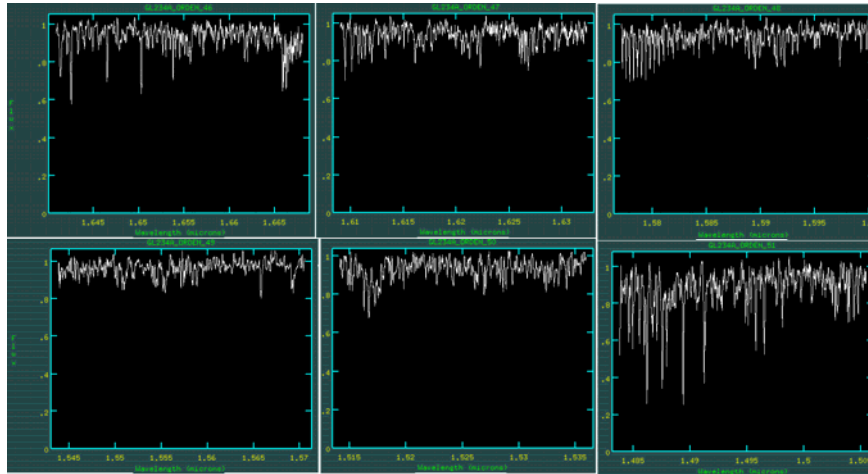


Figura 13. Órdenes obtenidos para G1234A (M4.5V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 46, 47 y 48 (de izquierda a derecha), las tres imágenes inferiores son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha), el resto de órdenes no se pudieron obtener.

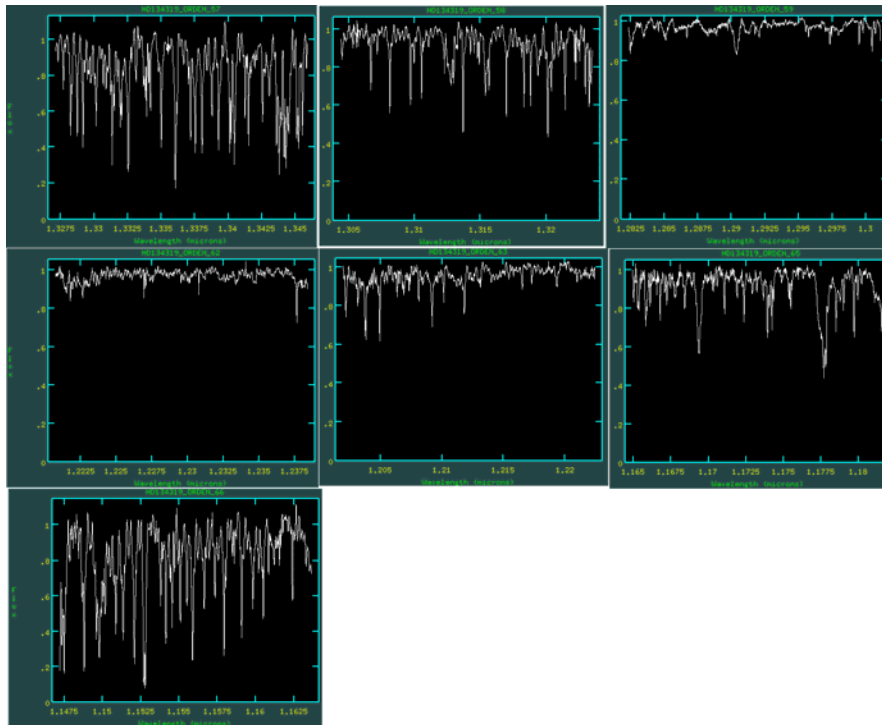


Figura 14. Órdenes obtenidos para HD134319B (M5V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 57, 58 y 59 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 62, 63 y 65 (de izquierda a derecha), la imagen inferior es el orden 66.

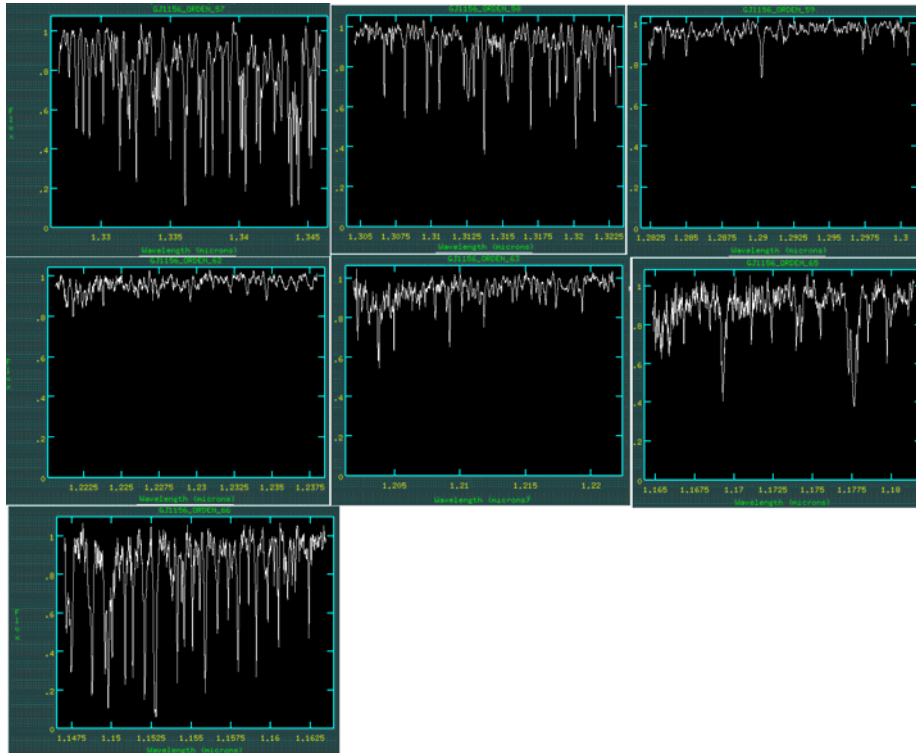


Figura 15. Órdenes obtenidos para GJ1156 (M5V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 57, 58 y 59 (de izquierda a derecha), las tres imágenes centrales son los órdenes 62, 63 y 65 (de izquierda a derecha), la imagen inferior es el orden 66.

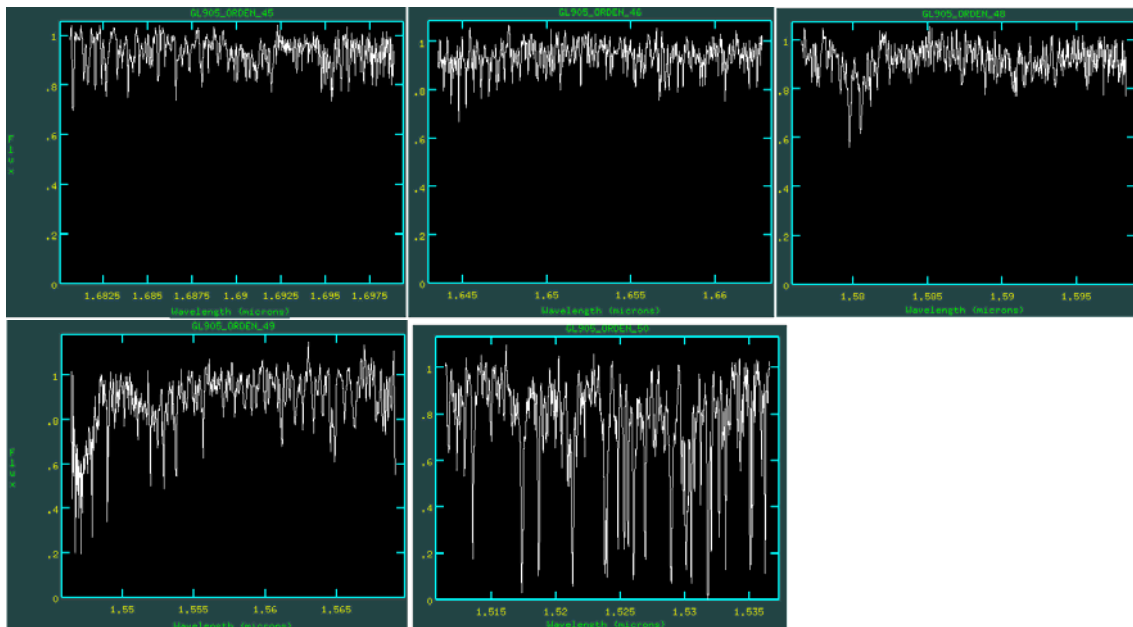


Figura 16. Órdenes obtenidos para G1905 (M5V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 45, 48 y 49 (de izquierda a derecha), las dos imágenes inferiores son los órdenes 49 y 50 (de izquierda a derecha).

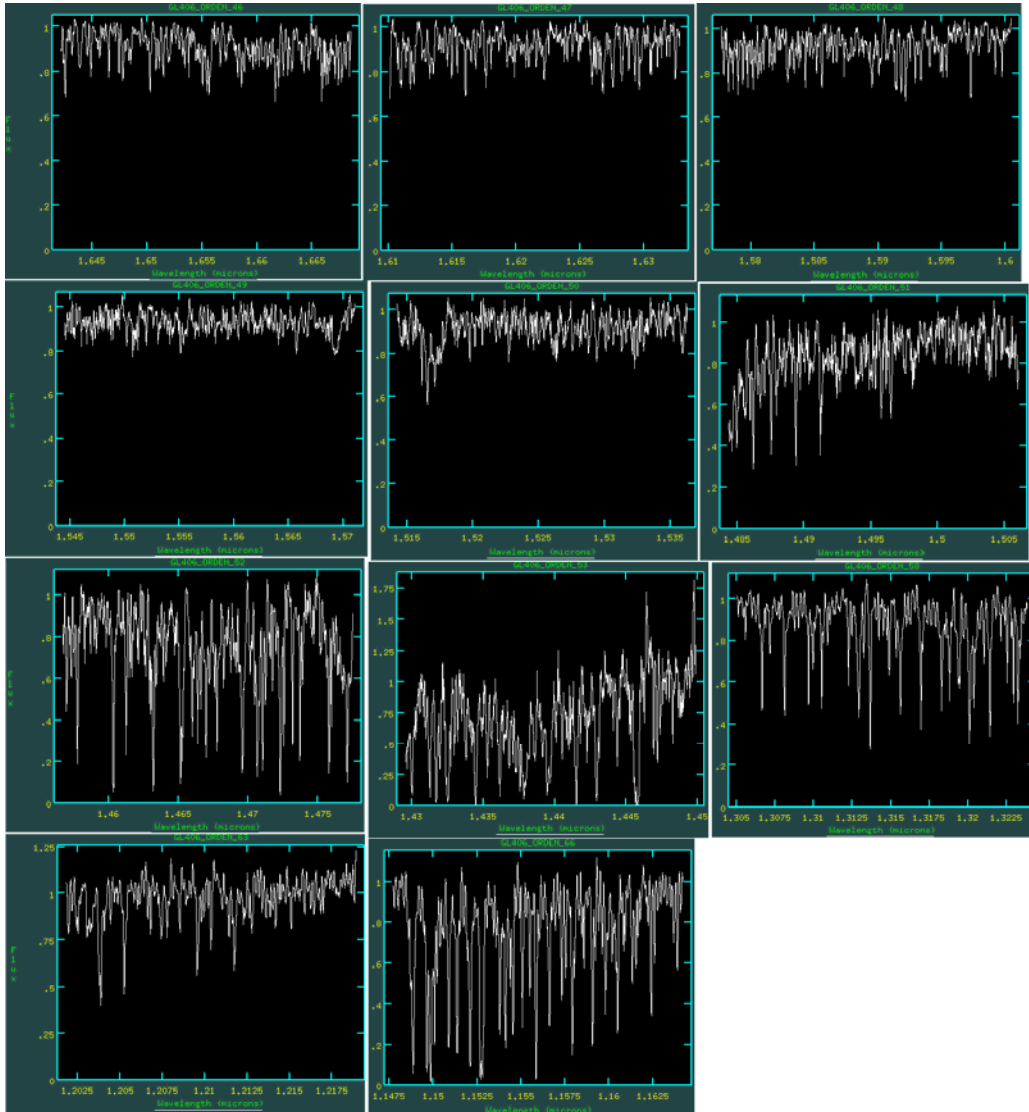


Figura 17. Órdenes obtenidos para G1406 (M6.5V), las tres imágenes superiores corresponden a los órdenes 46, 47 y 48 (de izquierda a derecha), las siguientes tres son los órdenes 49, 50 y 51 (de izquierda a derecha), las siguientes tres son los órdenes 52, 53 y 58 (de izquierda a derecha), por último las dos imágenes inferiores son los órdenes 63 y 66 (de izquierda a derecha), esta estrella es la única que se ha observado tanto en el filtro N3 como N5 de todas las estrellas de nuestra muestra.

