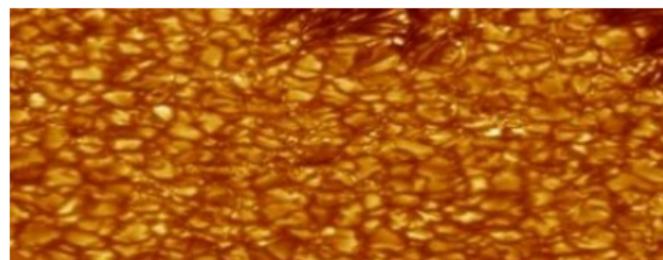


Medida y caracterización de los patrones de granulación del espectro solar IAG

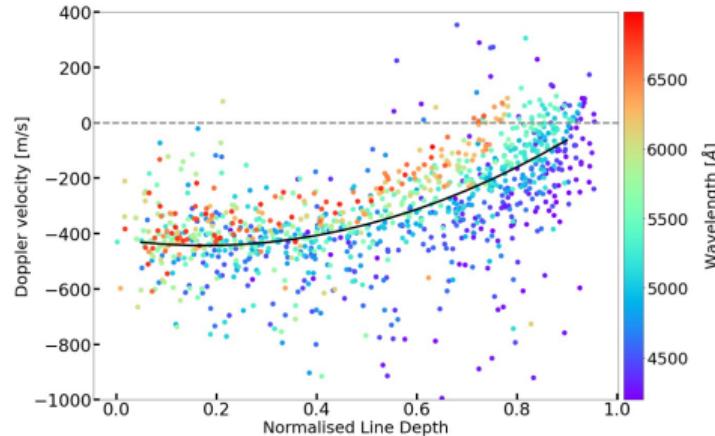
Universidad de los Andes-Departamento de Física

Claudia Alejandra Cuellar Nieto*
Benjamin Oostra Vannoppen**

Forma de caracterizar cómo el movimiento de convección afecta al espectro estelar, dado que este se presenta en forma de granulación en la fotosfera.



(a) Estructura granular observada en la fotosfera solar. Imagen tomada de [1].



(b) Ejemplo del patrón de granulación para el tercer signo de convección en la fotosfera solar. Imagen tomada de [2].

¹S. A. Hamouda et al., «Sunspots Production and Relation to Other Phenomena: A review», *International Journal of Science and Research Methodology*, jun. de 2018. dirección: <https://ijsrn.humanjournals.com/sunspots-production-and-relation-to-other-phenomena-a-review/>

²M. Ellwarth et al., «Convective Characteristics of Fe I Lines Across the Solar Disc», en, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 680, A62, dic. de 2023, issn: 0004-6361, 1432-0746. dirección: <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2023/12/aa47615-23/aa47615-23.html>

¿Qué es el movimiento de convección?

Movimiento característico presente en fluidos sometidos a gradientes de temperatura y densidad, produciendo celdas de fluido caliente que ascienden a la superficie, transmitiendo calor [3].

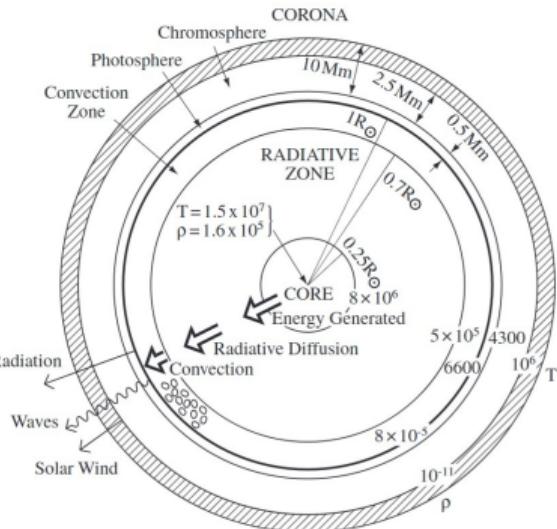


Figura 2: Estructura interna del sol dividida en capas. Imagen tomada de [4].

³H. H. Plaskett, «Solar Granulation», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 96, pág. 402, mar. de 1936, ISSN: 0035-8711. dirección:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1936MNRAS..96..402P>

⁴P. Foukal, *Solar Astrophysics*. Cambridge research e instrumentation, 1990, ISBN: 978-3-527-40374-5

¿Cómo afecta el movimiento de convección al espectro?

La celda convectiva emitirá *blueshift* al subir por la fotosfera. A medida que el material se enfriá y cae de vuelta a la base de la fotosfera, emite *redshift* pero con menos luz, lo que hace al *blueshift* dominante [5]. Este fenómeno es conocido como **blueshift convectivo**.

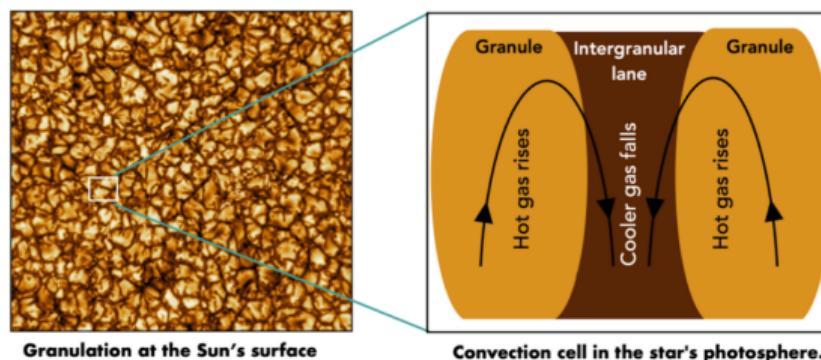


Figura 3: Diagrama de la trayectoria de una celda convectiva a través de la fotosfera solar. Imagen tomada de [6].

⁵B. Carroll y D. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press, 2017, ISBN: 9781108422161. dirección: <https://books.google.com.co/books?id=PY0wDwAAQBAJ>

⁶S Dalal et al., «Predicting convective blueshift and radial-velocity dispersion due to granulation for FGK stars», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 525, n.º 3, 3344–3353, ago. de 2023, ISSN: 1365-2966. dirección: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stad2393>

El movimiento de convección ha sido extensamente documentado por David Gray, quien definió tres signos de convección para el espectro estelar [7].

Primer signo:
Ensanchamiento de
línea
Curvatura.

Segundo signo:
Asimetría en el perfil de
línea
Pendiente de la bisectriz
en el núcleo de la línea.

Tercer signo: Blueshift
convectivo
Velocidad relativa.

Evaluados en la longitud de onda observada y relacionados con la profundidad de la línea de absorción.

⁶D. Gray, «The Third Signature of Stellar Granulation», en, *The Astrophysical Journal*, vol. 697, n.º 2, pág. 1032, mayo de 2009, ISSN: 0004-637X.
dirección: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1032>

Ecuación para curvatura:

$$\lambda_{\text{obs}}^2 f''(\lambda_{\text{obs}}) \quad (1)$$

Relación teórica para curvatura y profundidad de la línea:

$$\frac{|f''(\lambda_{\text{obs}})|}{L_D} \lambda^2 = \frac{c^2}{\langle v_r^2 \rangle + \langle v_T^2 \rangle + \langle v_{\text{conv}}^2 \rangle} \quad (2)$$

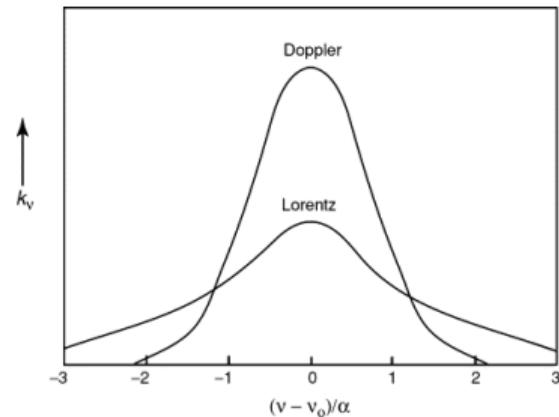


Figura 4: Ilustración del efecto Doppler de ensanchamiento. Imagen tomada de [8].

⁷«Chapter 1 - Fundamentals of Radiation for Atmospheric Applications», en *An Introduction to Atmospheric Radiation*, ép. International Geophysics, K. Liou, ed., vol. 84, Academic Press, 2002, págs. 1-36. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007461420280016X>



El fenómeno de blueshift convectivo hace que la bisectriz del perfil de línea obtenga una forma de C [9].

Pendiente para el núcleo de la longitud de onda observada:

$$-\frac{c}{\lambda_{obs}} \left(\frac{f'''(\lambda_{obs})}{3(f''(\lambda_{obs}))^2} \right) \quad (3)$$

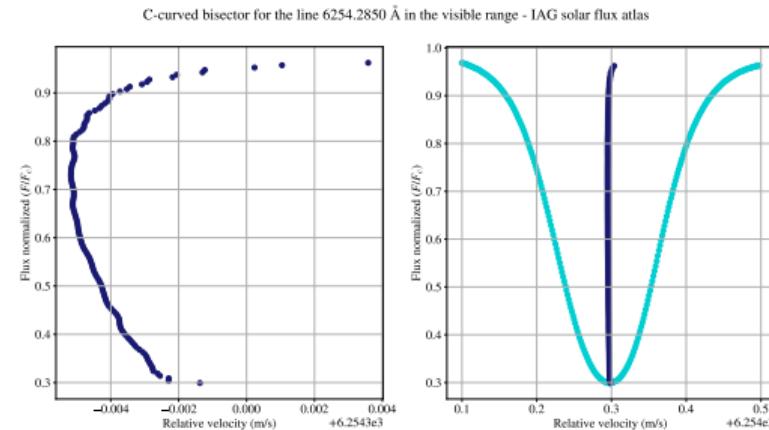


Figura 5: Bisectriz en forma de C para la línea 6254,2850 Å del espectro de flujo solar IAG.

⁸D. Hamilton y J. B. Lester, «A Technique for the Study of Stellar Convection: The Visible Solar Flux Spectrum», en, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 111, n.º 763, pág. 1132, sep. de 1999, issn: 1538-3873. dirección:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/316421/meta>

Velocidad relativa para el Sol:

$$v_r = \left(\frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{em}}} - 1 \right) c - 633 \text{ m/s} \quad (4)$$

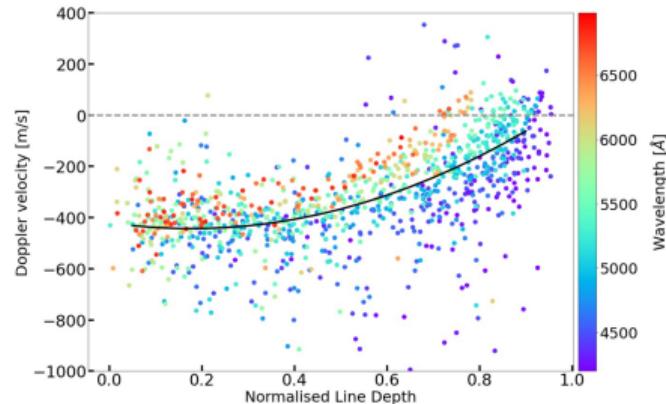


Figura 6: Gráfico del tercer signo de convección para el espectro del centro del disco solar IAG. Imagen tomada de [2].

²M. Ellwarth et al., «Convective Characteristics of Fe I Lines Across the Solar Disc», en, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 680, A62, dic. de 2023, issn: 0004-6361, 1432-0746. dirección: <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2023/12/aa47615-23/aa47615-23.html>

⁹D. F. Gray y T. Pugh, «The Third Signature of Granulation in Bright-Giant and Supergiant Stars», en, *The Astronomical Journal*, vol. 143, n.º 4, pág. 92, mar. de 2012, issn: 1538-3881. dirección: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/143/4/92>

Cromodependencia normal:

Tendencia de longitud de onda con respecto a la profundidad de línea sobre la misma curva de granulación.

Cromodependencia anómala:

El hecho observacional de que existan curvas de granulación individuales para rangos de longitud de onda.

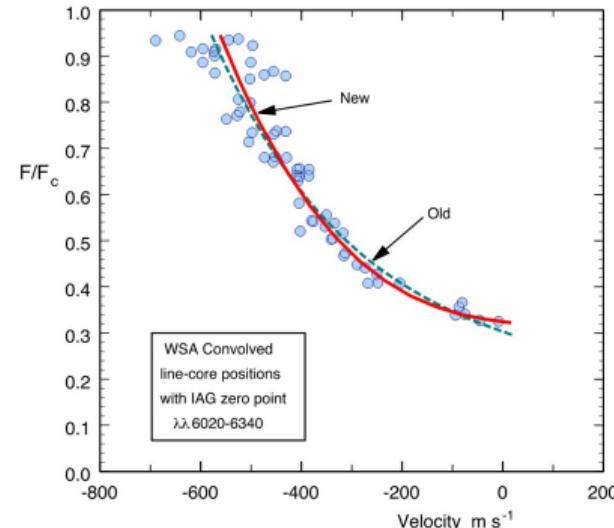


Figura 7: Curva de granulación estándar propuesta por Gray y Oostra para el rango espectral de 6020 Å al 6340 Å.Imagen tomada de [11].

¹⁰D. F. Gray y B. Oostra, «The Solar-Flux Third Granulation Signature», *The Astrophysical Journal*, vol. 852, pág. 42, ene. de 2018, issn: 0004-637X.
dirección: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...852...42G>

Medir los patrones de granulación del espectro de flujo solar del *Instituto de Astrofísica y Geofísica de Göttingen* IAG, para calcular velocidades relativas de todo el rango espectral. A partir de ello, caracterizar los tres signos de convección, enfocándose en la cromodependencia anómala.

¿Cuáles son las consecuencias espectroscópicas directas del movimiento de convección en el espectro solar?



Metodología

¿Cómo se calculó la longitud de onda observada?

1. Selección de líneas de la lista de Nave libre de mezclas para Fe I [12] en el espectro de flujo solar IAG y el espectro para el centro del disco solar IAG.
2. Separación del núcleo de la línea espectral con una ventana de 0,1 Å alrededor del mismo.
3. Ajuste polinomial de grado cuatro a la ventana de observación y determinación de la longitud de onda observada como el mínimo.

¹¹G. Nave et al., «A New Multiplet Table for Fe I», *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 94, pág. 221, sep. de 1994, issn: 0067-0049. dirección:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994ApJS...94..221N>

Espectro de flujo solar IAG

Reiners et. al 2016

Mayor precisión y resolución para el flujo solar hasta la fecha: Incertidumbre en la velocidad radial de ± 10 m/s a lo largo del rango de 4050 Å a 10 650 Å [13].

Espectro espacialmente resuelto del disco solar IAG

Ellwarth et. al 2023

Conjunto de espectros que cubre desde el centro del disco solar ($\mu = 1,0$) hasta el borde solar ($\mu = 0$), donde $\mu = \cos(\theta)$ con θ siendo el ángulo entre la normal a la superficie y la posición del observador [2].

¹²A. Reiners et al., «The IAG Solar Flux Atlas: Accurate Wavelengths and Absolute Convective Blueshift in Standard Solar Spectra», en, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 587, A65, mar. de 2016, issn: 0004-6361, 1432-0746. dirección:
<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2016/03/aa27530-15/aa27530-15.html>

²M. Ellwarth et al., «Convective Characteristics of Fe I Lines Across the Solar Disc», en, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 680, A62, dic. de 2023, issn: 0004-6361, 1432-0746. dirección: <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2023/12/aa47615-23/aa47615-23.html>

Cerca del borde del disco solar, vemos menos profundo de las capas solares, por lo que la luz es más débil [14].

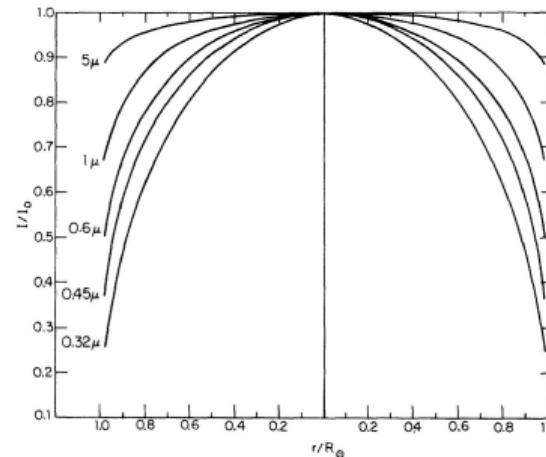


Figura 8: Perfil cuadrado para la intensidad del disco al incrementar longitud de onda, donde $5\mu\text{m}$ se refiere al rango infrarrojo y $0,32\mu\text{m}$ al rango violeta. Imagen tomada de [4].

⁴P. Foukal, *Solar Astrophysics*. Cambridge research e instrumentation, 1990, ISBN: 978-3-527-40374-5

¹³E. Priest, *Solar Magnetohydrodynamics*. Kluwer, 1982, ISBN: 978-3-527-40374-5

En 1994 Nave y colaboradores publicaron la lista de valores de laboratorio para Fe I, estas líneas son ideales para calibrar el espectro solar debido a su abundancia en el espectro, bajo efecto de ensanchamiento térmico y disponibilidad de valores precisos de longitud de onda emitida [12].

Para el proyecto, se seleccionaron líneas de calidad A pertenecientes al sol y sin mezclas en el espectro.

¹¹G. Nave et al., «A New Multiplet Table for Fe I», *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 94, pág. 221, sep. de 1994, issn: 0067-0049. dirección:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994ApJS...94..221N>

Patrones de granulación

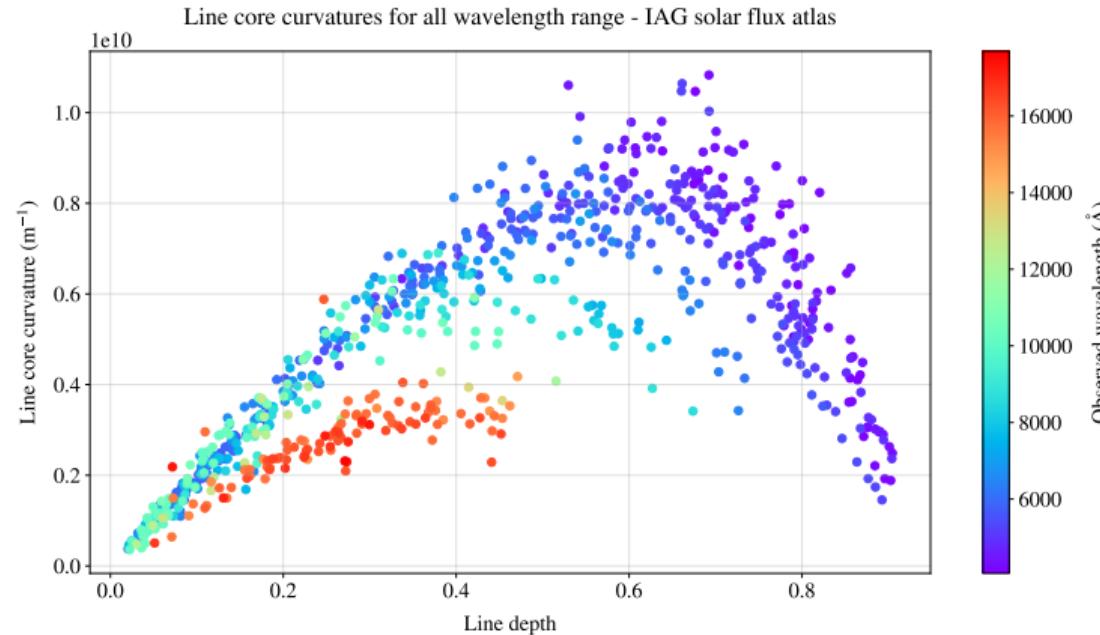
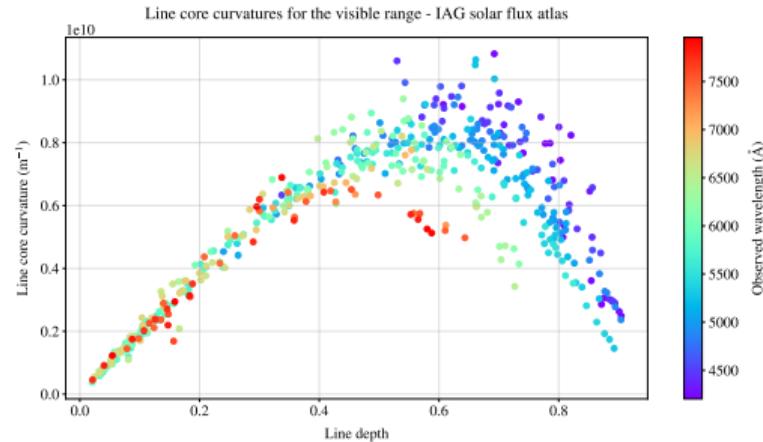
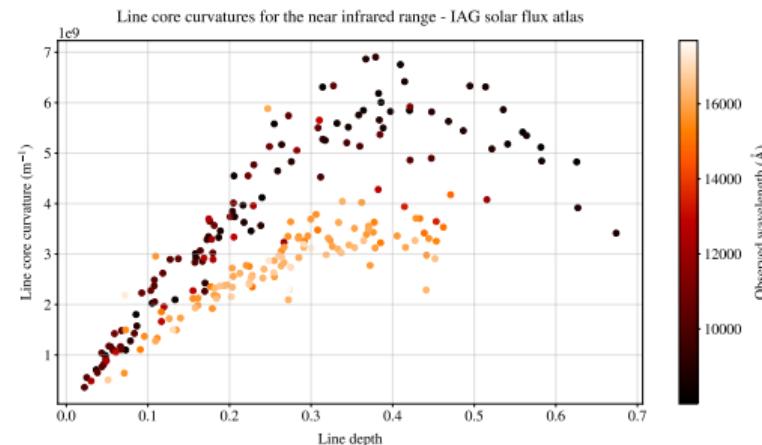


Figura 9: Curvaturas de longitudes de onda observadas para el espectro de flujo solar IAG. Mientras que la banda J del infrarrojo cercano se ajusta a la tendencia de cromodependencia general, la banda H sigue un comportamiento completamente diferente.

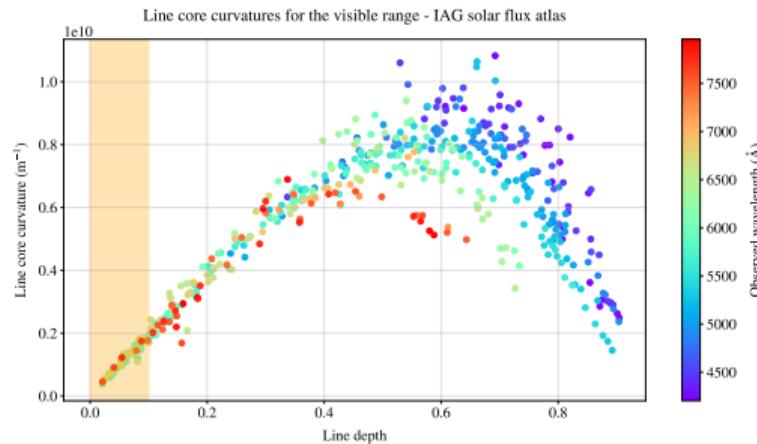


(a) La curvatura de las líneas débiles es proporcional a la profundidad y las líneas profundas presentan una reducción en su curvatura con dependencia en la longitud de onda.

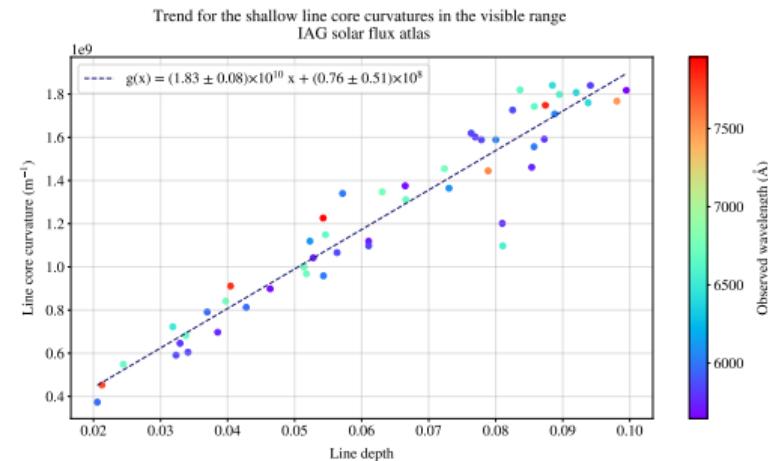


(b) El gráfico muestra una separación de bandas naturales en 14 000 Å.

Figura 10: Curvaturas de longitudes de onda observadas para el espectro de flujo solar IAG separado en rangos de longitudes de onda.

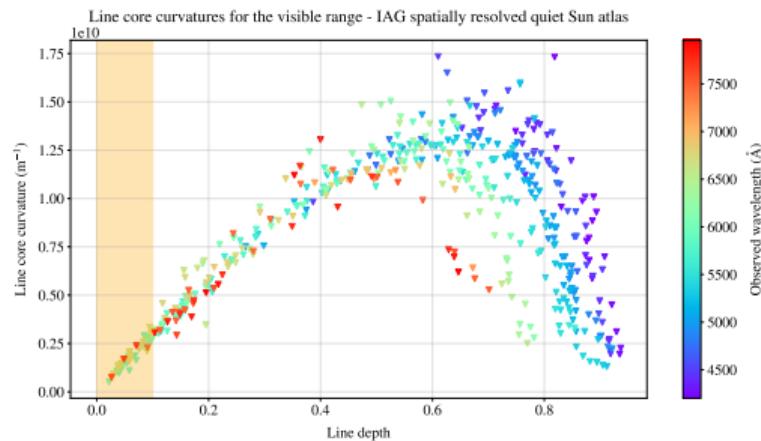


(a) Patrón de granulación del primer signo de convección.

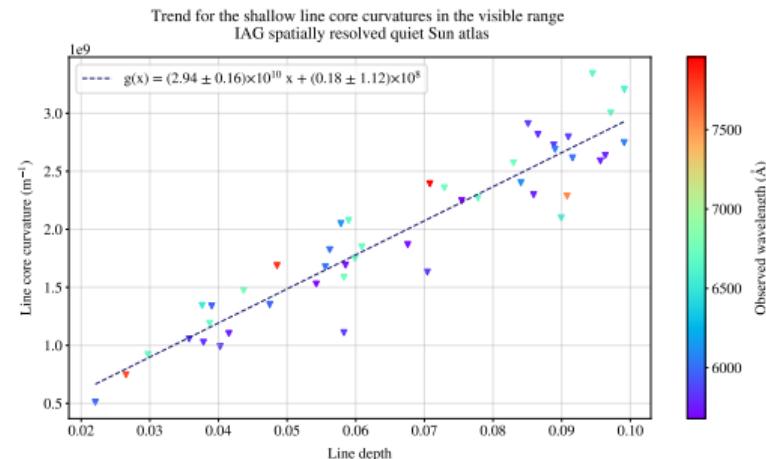


(b) Ajuste lineal aplicado al rango de (0,0 – 0,1) de la profundidad de línea.

Figura 11: Rango visible del espectro de flujo solar IAG.



(a) Patrón de granulación del primer signo de convección.



(b) Ajuste lineal aplicado al rango de (0,0 – 0,1) de la profundidad de línea.

Figura 12: Rango visible del espectro del centro del disco solar IAG.

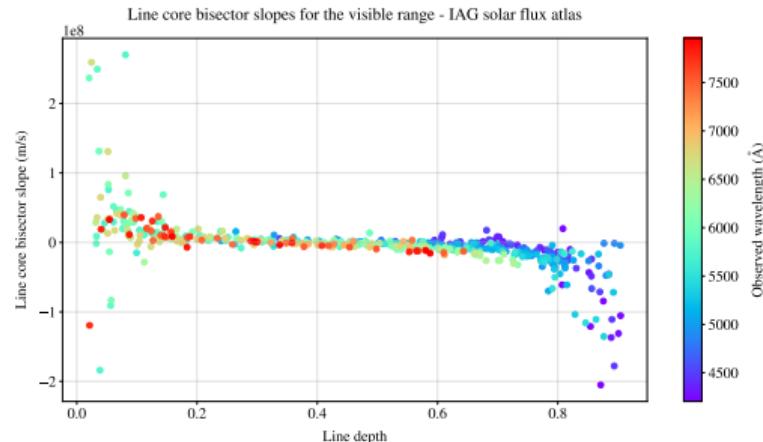
El ensanchamiento por convección es el factor principal, la varianza de la velocidad convectiva no es solo 600 m/s de la curva de granulación.

Espectro de flujo solar IAG:

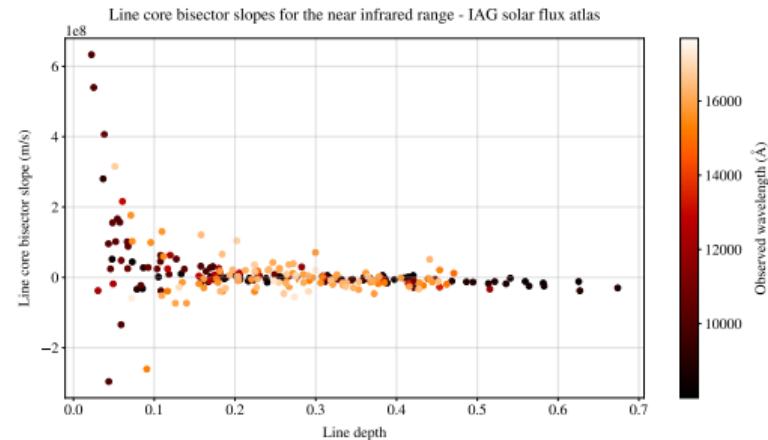
$$\frac{|f''(0)|}{L_D} \lambda^2 = \frac{c^2}{0,90(\text{km/s})^2 + 0,86(\text{km/s})^2 + \langle v_{\text{conv}}^2 \rangle} \rightarrow \langle v_{\text{conv}}^2 \rangle = 3,15(\text{km/s})^2 \quad (5)$$

Espectro del centro del disco solar IAG:

$$\frac{|f''(0)|}{L_D} \lambda^2 = \frac{c^2}{0,86(\text{km/s})^2 + \langle v_{\text{conv}}^2 \rangle} \rightarrow \langle v_{\text{conv}}^2 \rangle = 2,20(\text{km/s})^2 \quad (6)$$

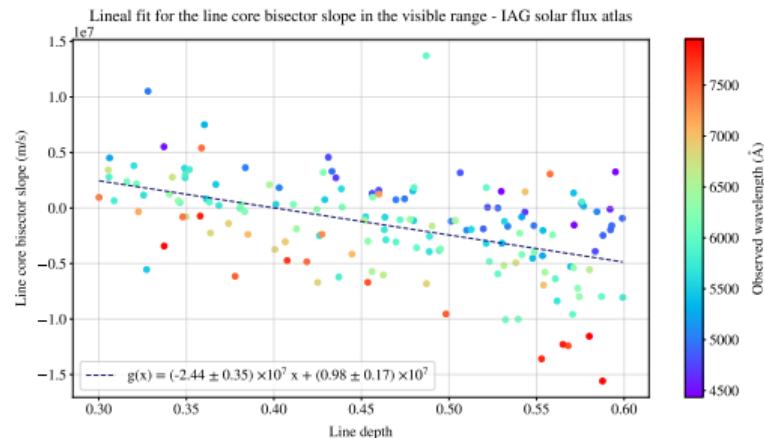


(a) Rango visible.

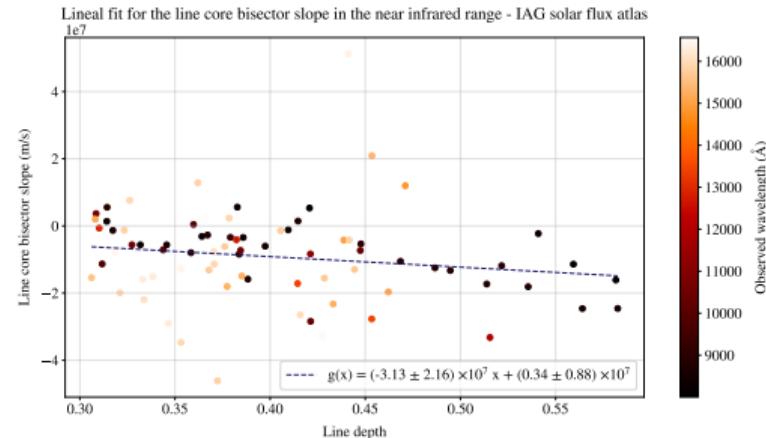


(b) Rango del infrarrojo cercano.

Figura 13: Pendientes del núcleo de longitudes de onda observadas para el espectro de flujo solar IAG.

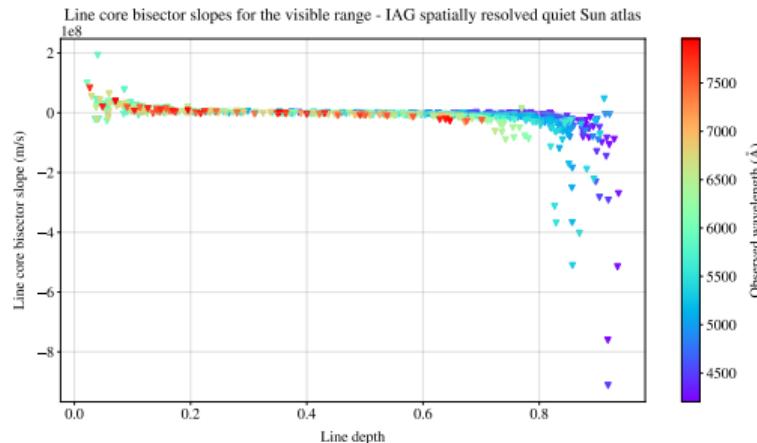


(a) Rango visible.

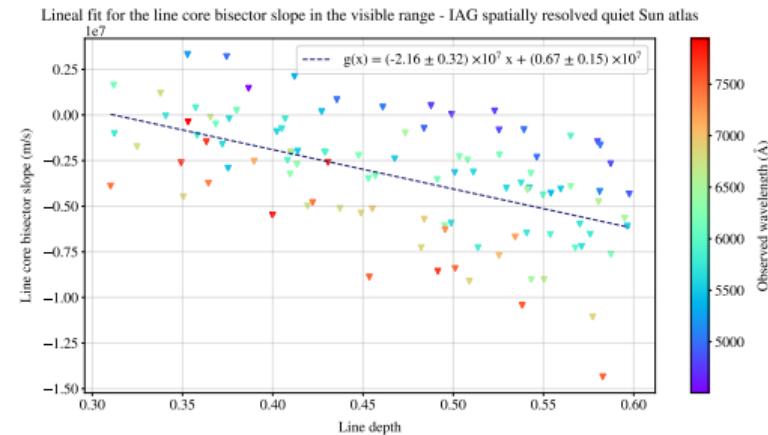


(b) Rango del infrarrojo cercano.

Figura 14: Ajuste lineal aplicado al rango (0,3 – 0,6) de profundidad de línea en el espectro de flujo solar IAG, donde la cromodependencia anómala es evidente.



(a) Patrón de granulación del segundo signo de convección.



(b) Ajuste lineal aplicado al rango (0,3 – 0,6) de profundidad de línea, donde la cromodependencia anómala es evidente.

Figura 15: Rango visible para el espectro del centro del disco solar IAG.

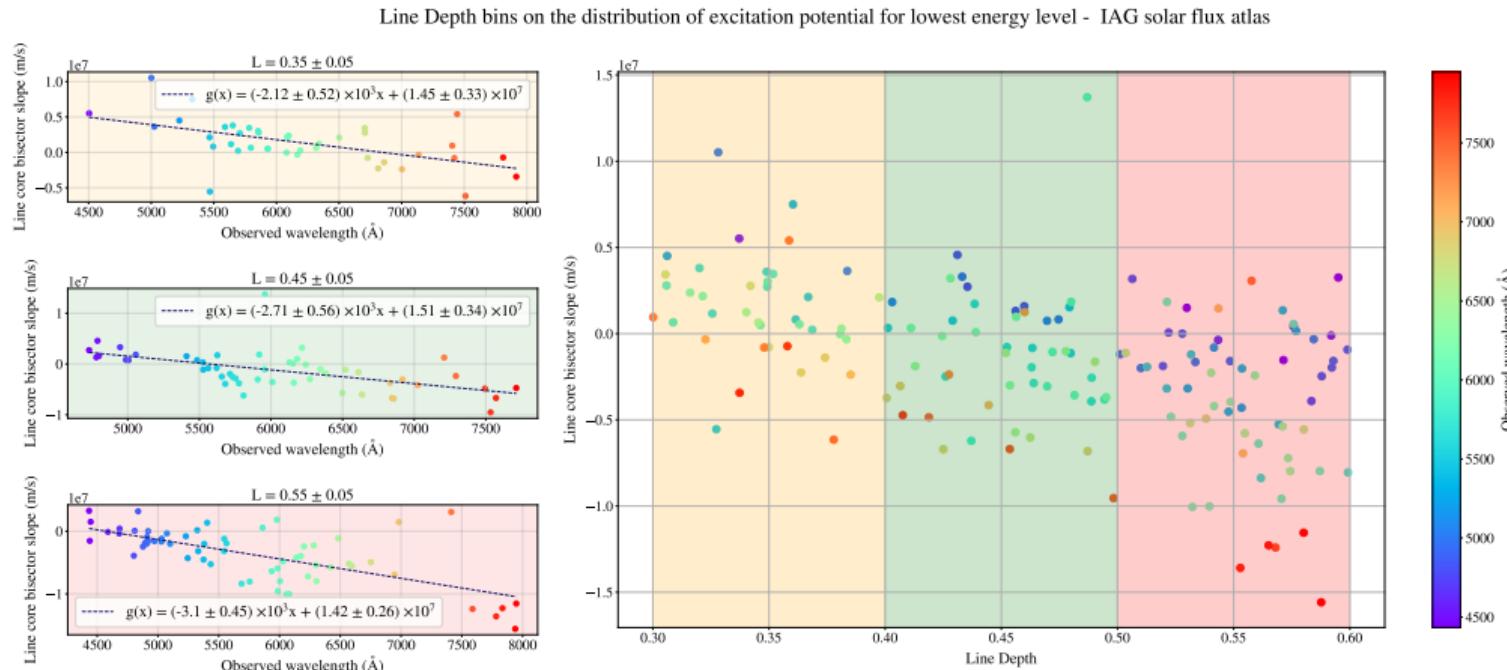


Figura 16: Secciones de profundidad de línea de 0.1 para el rango visible del espectro de flujo solar IAG.

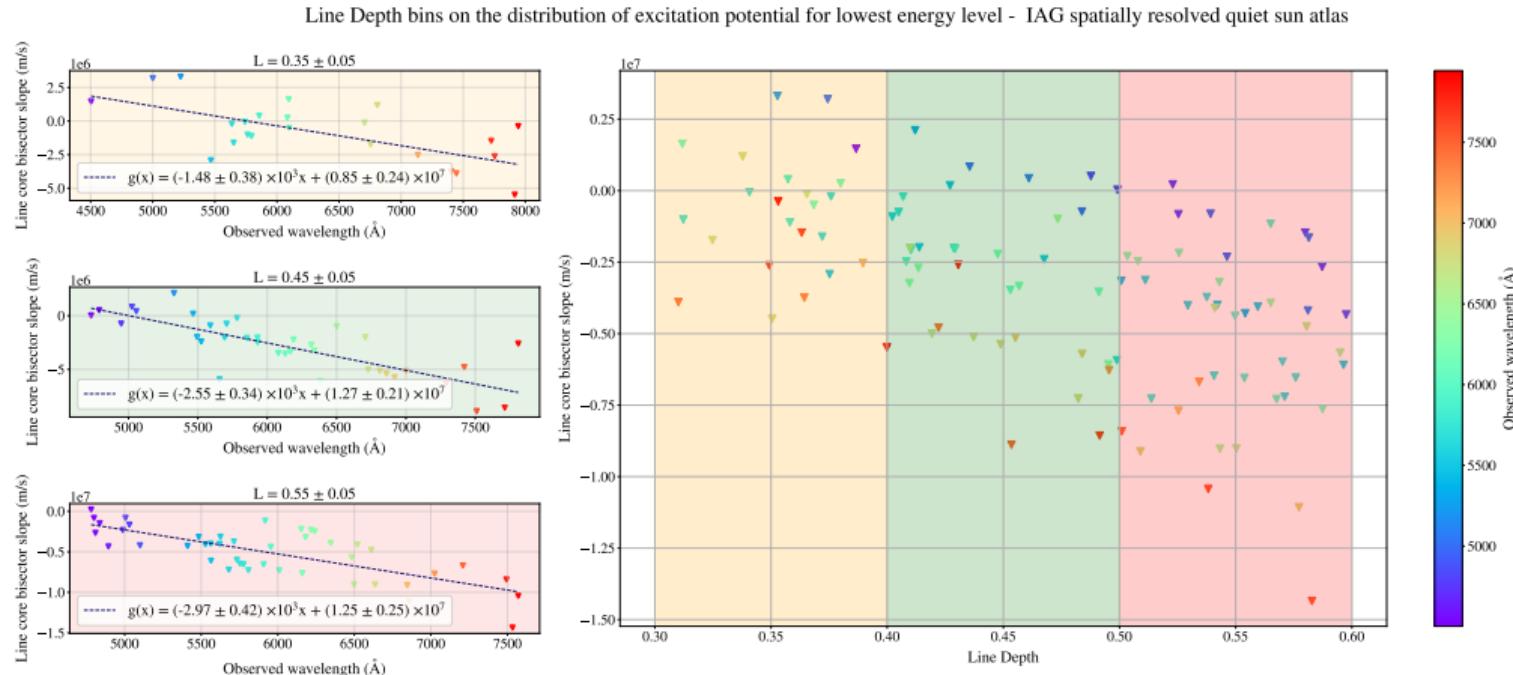
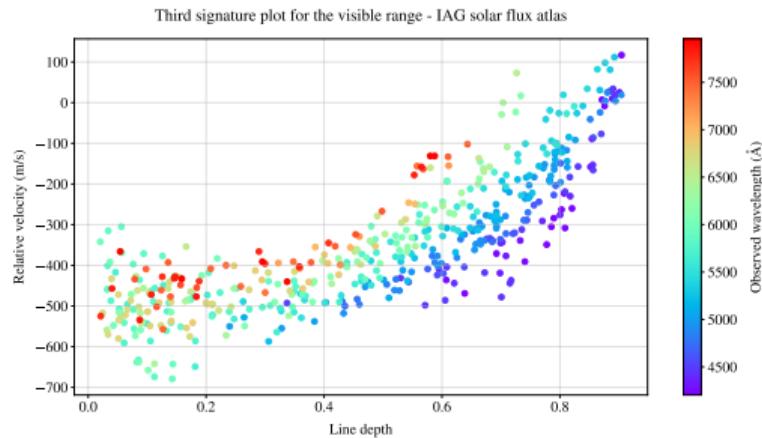
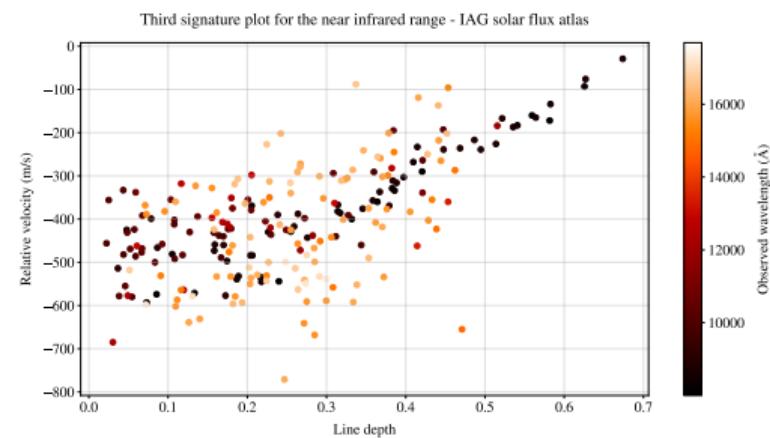


Figura 17: Secciones de profundidad de línea de 0,1 para el rango visible del espectro del centro del disco solar IAG.

Para el rango de profundidad de línea de 0,3 – 0,6, las pendientes aumentan con la profundidad de línea en ambos espectros, pero con valores cuantitativos menores en el centro del disco solar. Una posible causa es el efecto del oscurecimiento de borde.



(a) Rango visible..



(b) Rango del infrarrojo cercano.

Figura 18: Patrón de granulación para el tercer signo de convección del espectro de flujo solar IAG, en ambos se observa que la velocidad relativa es dependiente de la longitud de onda.

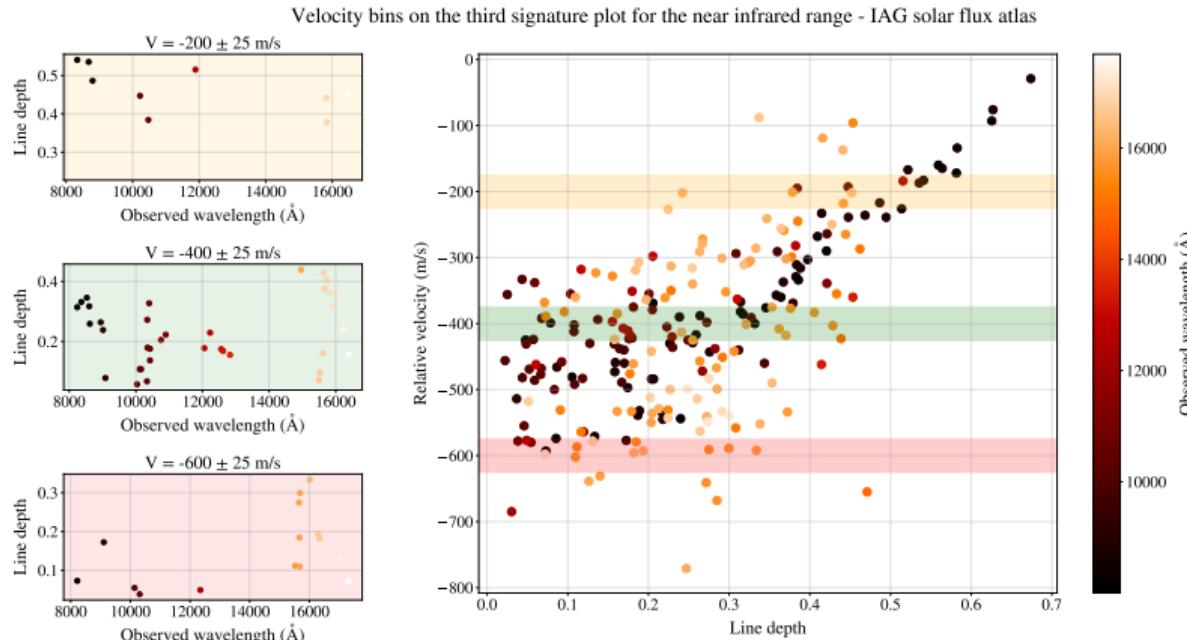


Figura 19: Secciones de velocidad de $\pm 50 \text{ m/s}$ para la relación entre longitud de onda y profundidad de línea, para el rango del infrarrojo cercano donde es notable la separación en bandas naturales del espectro de flujo solar IAG.

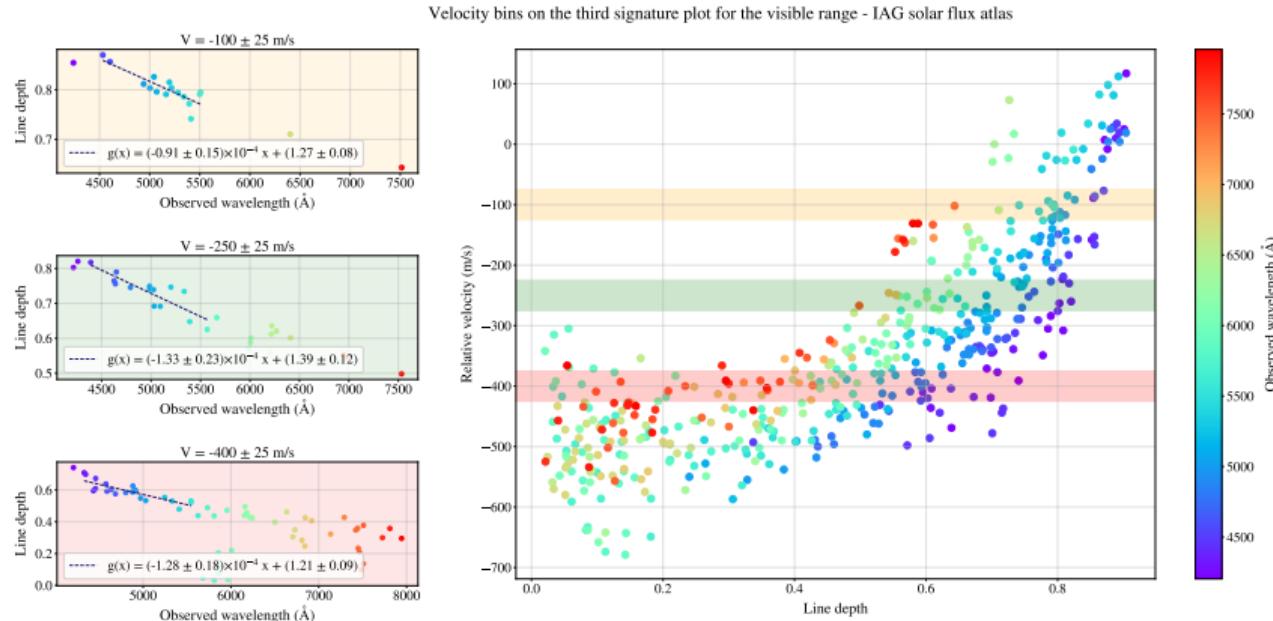


Figura 20: Secciones de velocidad de $\pm 50 \text{ m/s}$ para la relación entre longitud de onda y profundidad de línea, para el rango visible del espectro de flujo solar IAG, con su respectivo ajuste lineal para el rango de longitud de onda de 4300 \AA - 5600 \AA .

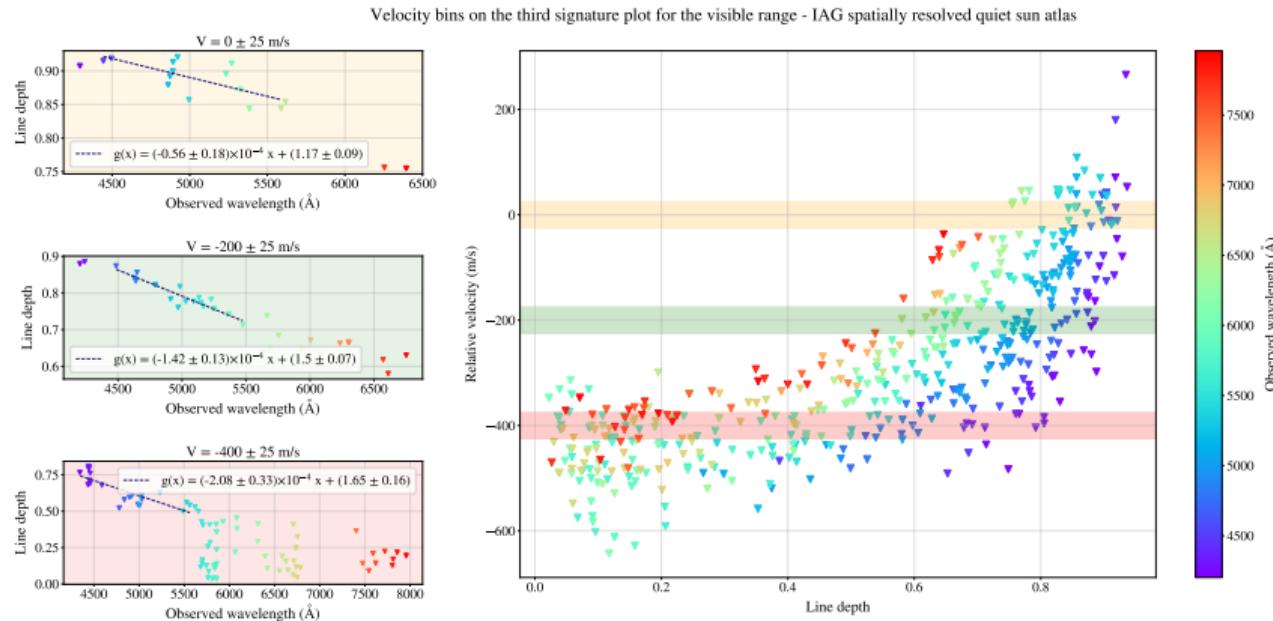


Figura 21: Secciones de velocidad de $\pm 50 \text{ m/s}$ para la relación entre longitud de onda y profundidad de línea, para el rango visible del espectro del centro del disco solar IAG, con su respectivo ajuste lineal para el rango de longitud de onda de 4300 \AA - 5600 \AA .

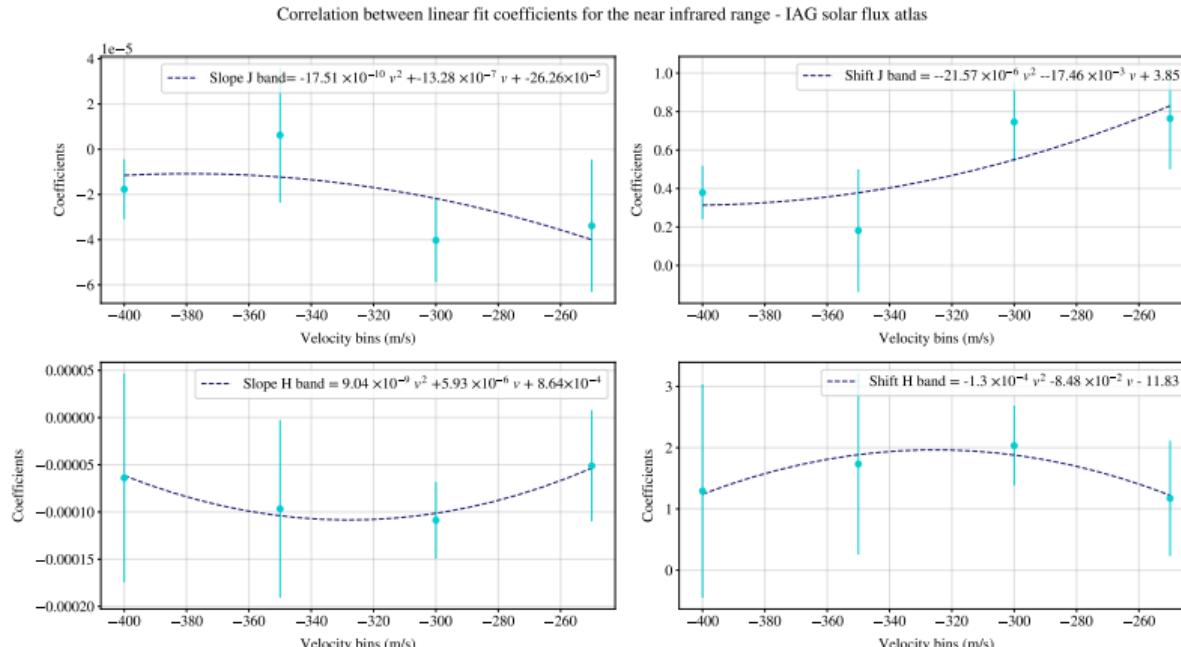
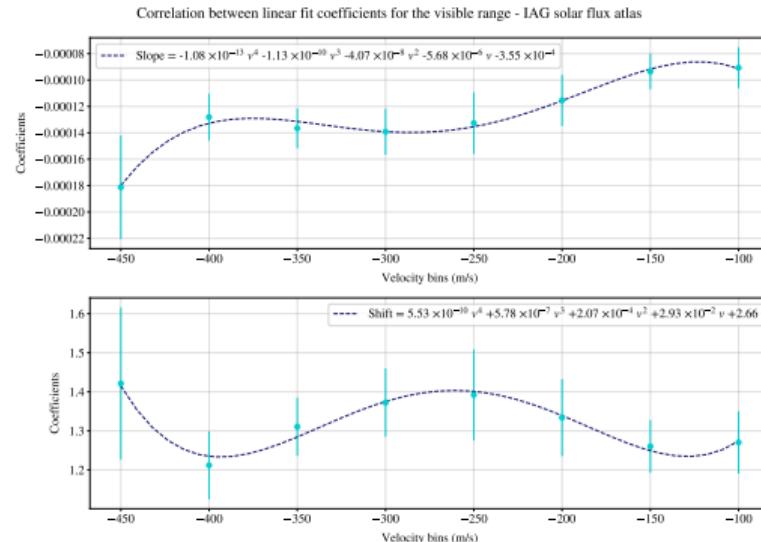
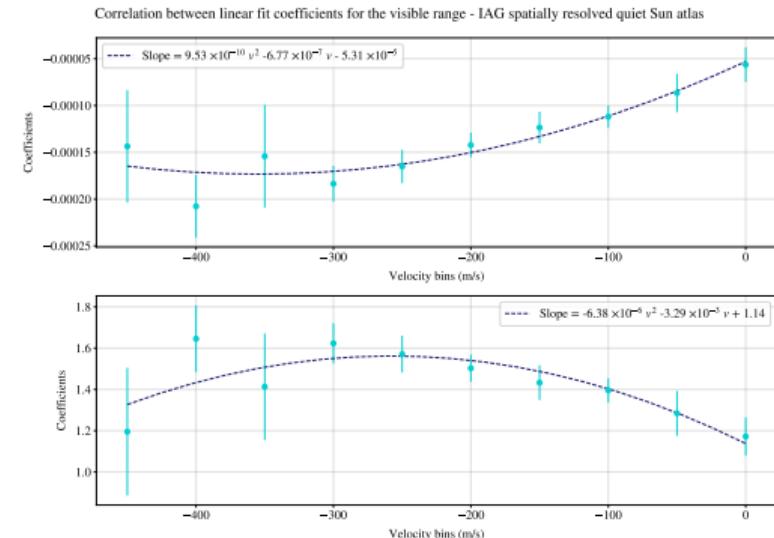


Figura 22: Coeficientes de cada ajuste lineal realizado en las secciones de velocidad separado por bandas naturales para el rango del infrarrojo cercano del espectro de flujo solar IAG.



(a) Espectro de flujo solar IAG.



(b) Espectro del centro del disco espacial IAG.

Figura 23: Coeficientes de cada ajuste lineal realizado en las secciones de velocidad para el rango visible.

Existe un fenómeno que genera la cromodependencia anómala, y no es despreciable en el espectro del centro del disco solar. Se observó el desplazamiento de velocidad en ambos espectros, y la magnitud en el espectro del centro del disco resultó ser mayor que la del espectro de flujo.

Se descarta la rotación del Sol como causa de cromodependencia anómala.

Caracterización de la cromodependencia en el tercer signo

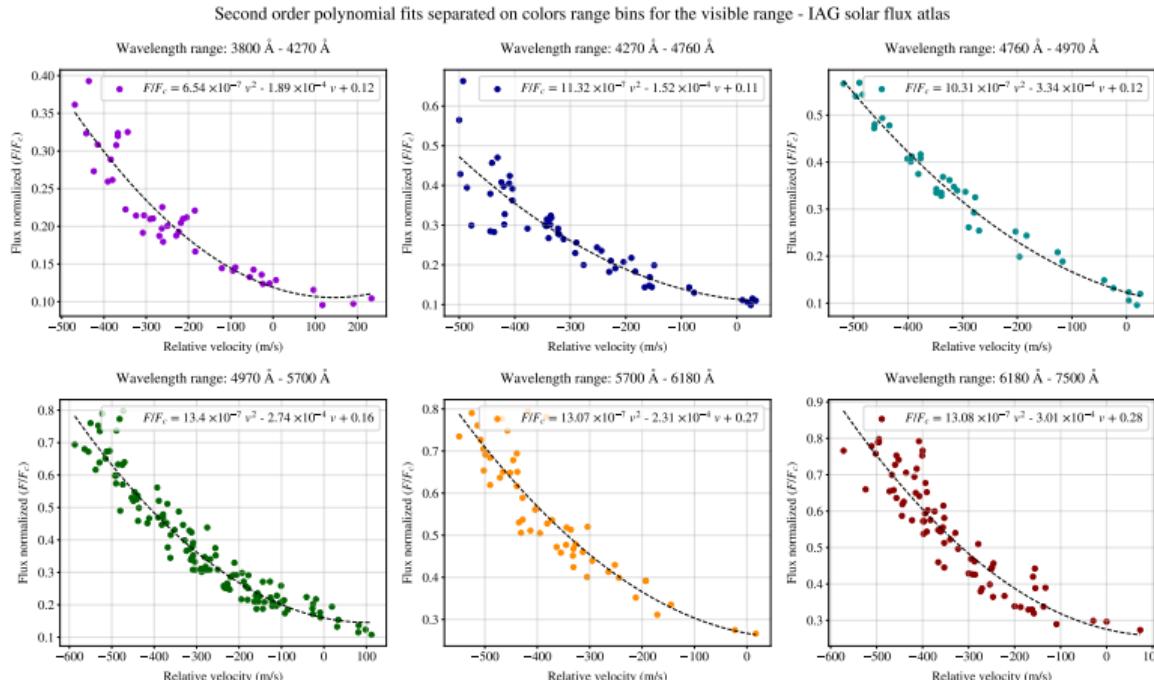


Figura 24: Curvas de granulación ajustadas a rangos de longitud de onda específicos del patrón de granulación del tercer signo de convección para el rango visible del espectro de flujo solar IAG.

Caracterización de la cromodependencia en el tercer signo

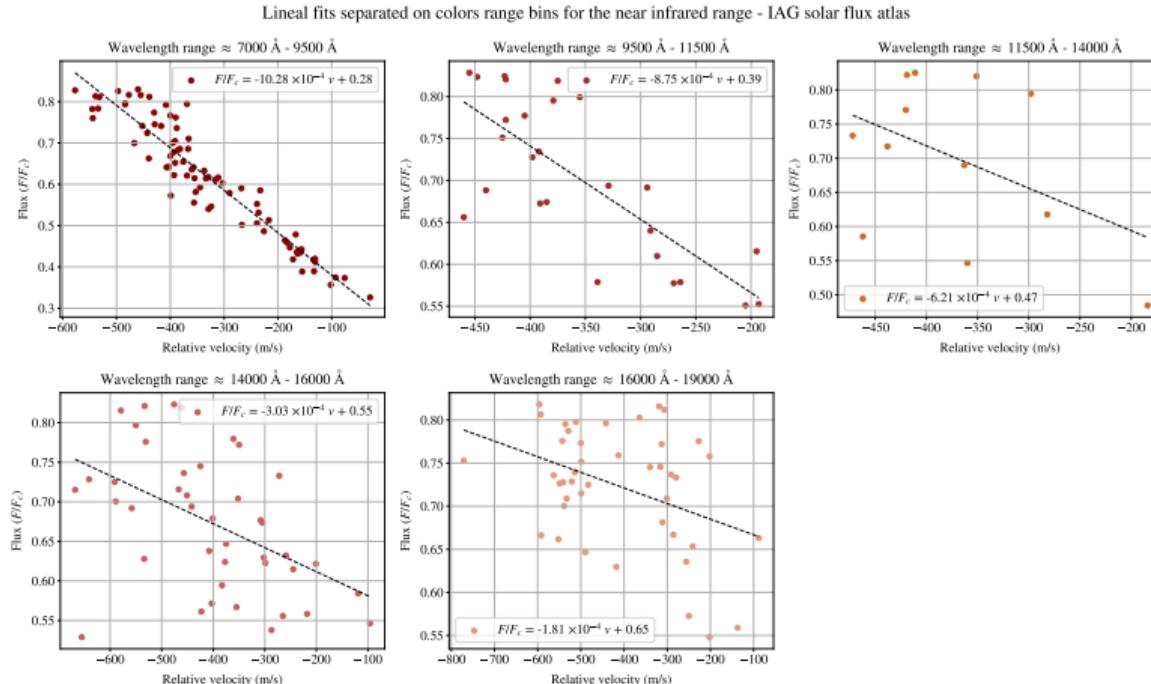
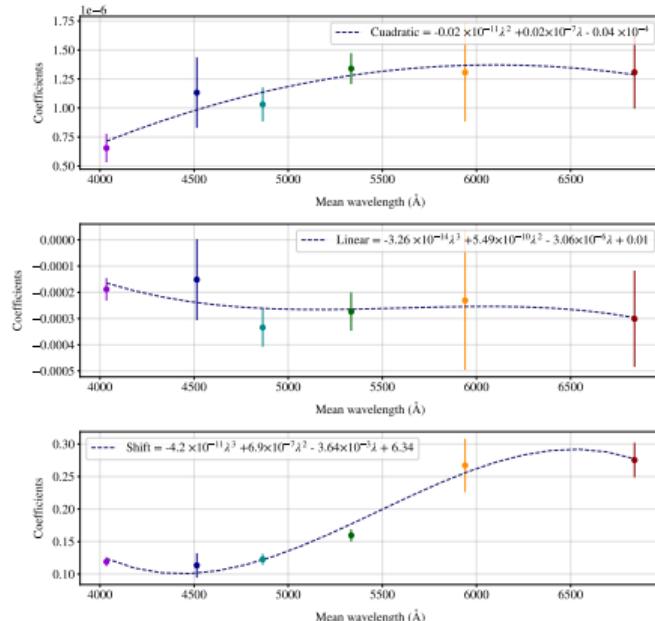


Figura 25: Líneas de granulación ajustadas a rangos de longitud de onda específicos del patrón de granulación del tercer signo de convección para el rango del infrarrojo cercano del espectro de flujo solar IAG.

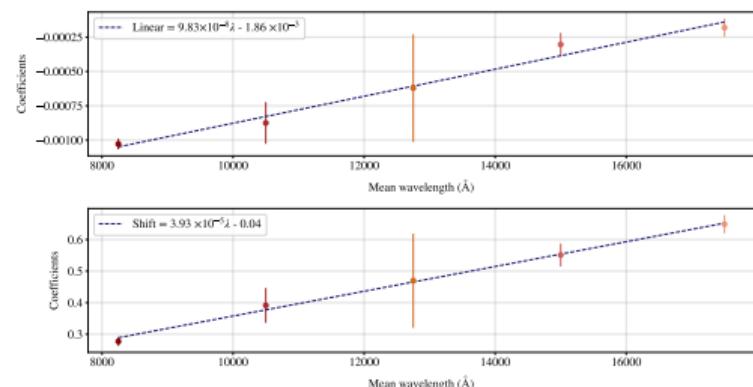
Caracterización de la cromodependencia en el tercer signo

Correlation between second order polynomial fit coefficients across wavelength for the visible range - IAG solar flux atlas



(a) Rango visible.

Correlation between linear fit coefficients across wavelength for the near infrared range - IAG solar flux atlas



(b) Rango del infrarrojo cercano.

Figura 26: Coeficientes de cada curva de granulación para el espectro de flujo solar IAG.

El rango del infrarrojo cercano presenta una tendencia linear entre ajustes lineales, por lo que su curva de granulación estándar es descrita por la ecuación (7).

$$\frac{F}{F_c}(\lambda, v) = (9,83 \times 10^{-8}\lambda - 1,86 \times 10^{-3})v + 3,93 \times 10^{-5}\lambda - 0,04 \quad (7)$$

En el caso del rango visible, se reportan curvas de granulación individuales mostradas en la ecuación (8), cuyos coeficientes que dependen de la longitud de onda son listados en la tabla 1.

$$\frac{F}{F_c}(\lambda, v) = \alpha(\lambda)v^2 + \beta(\lambda)v + \gamma(\lambda) \quad (8)$$

Caracterización de la cromodependencia en el tercer signo

Longitud de onda (Å)	$\alpha(\lambda)$ ($\times 10^{-6}$)	$\beta(\lambda)$	$\gamma(\lambda)$	σ_α ($\times 10^{-7}$)	σ_β	σ_γ
3800-4270	0.654	-0.0001	0.119	1.226	0.0004	0.0068
4270-4760	1.132	-0.0001	0.113	3.043	0.0001	0.0188
4760-4970	1.030	-0.0003	0.122	1.472	0.0001	0.0085
4970-5700	1.339	-0.0002	0.159	1.331	0.0001	0.0094
5700-6180	1.306	-0.0002	0.267	4.235	0.0002	0.0412
6180-7800	1.307	-0.0003	0.275	3.133	0.0001	0.0266

Cuadro 1: Coeficientes correspondientes a cada curva de granulación para el rango visible del espectro de flujo solar IAG.

- ★ Se describió y caracterizó los patrones de granulación que describen los tres signos de convección en el espectro de flujo solar IAG.
- ★ Con ayuda del espectro del centro del disco solar IAG se descarta a la rotación como una causa de la cromodependencia anómala.
- ★ Se reporta cromodependencia en el rango del infrarrojo cercano.
- ★ Se establecieron curvas de granulación para todo el rango espectral del espectro de flujo solar.
- ★ Se reporta una lista de líneas de Fe I libre de mezclas para el análisis de granulación en el Sol.

- ★ Estudiar la universalidad del patrón de granulación del tercer signo de convección en estrellas como Aldebarán, Arturo y Antares.
- ★ Comprobar el escalamiento en todo el rango espectral de las curvas de granulación.
- ★ Estudiar efectos atómicos de ensanchamiento de línea.
- ★ Optimizar el método de selección de líneas de Fe I.



Muchas gracias por su atención

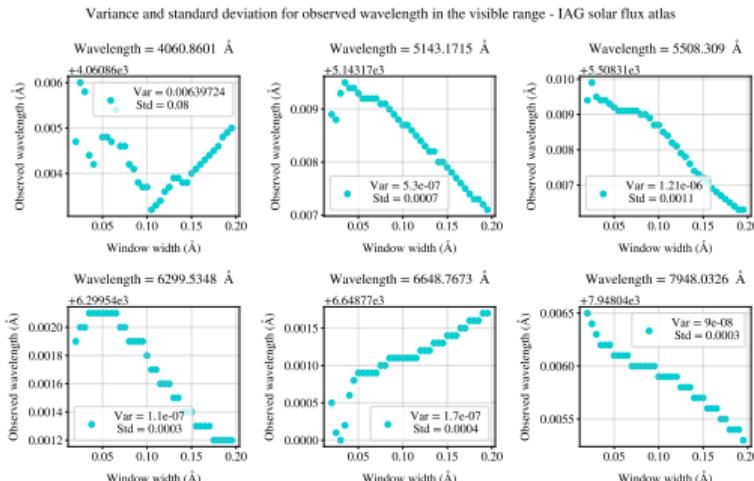
¿Preguntas?

En el proyecto se siguió la metodología de Allende y Garcia [15] para el cálculo de la longitud de onda observada.

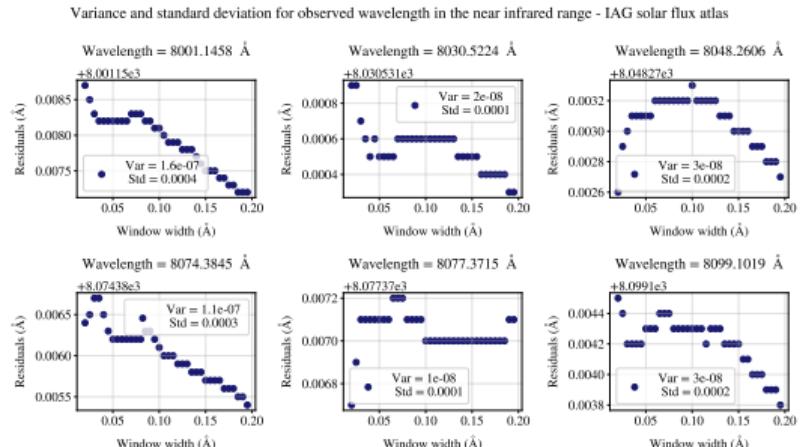
Encontrar la ventana que asegurara la mínima varianza en los valores de longitud de onda calculada para todo el rango del espectro, incluyendo el infrarrojo cercano.

¹⁴C. Allende Prieto y R. J. Garcia Lopez, «Fe I line shifts in the optical spectrum of the Sun», *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 129, págs. 41-44, abr. de 1998, ISSN: 0365-0138. dirección: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998AAS..129...41A> 

Variación en la ventana de observación



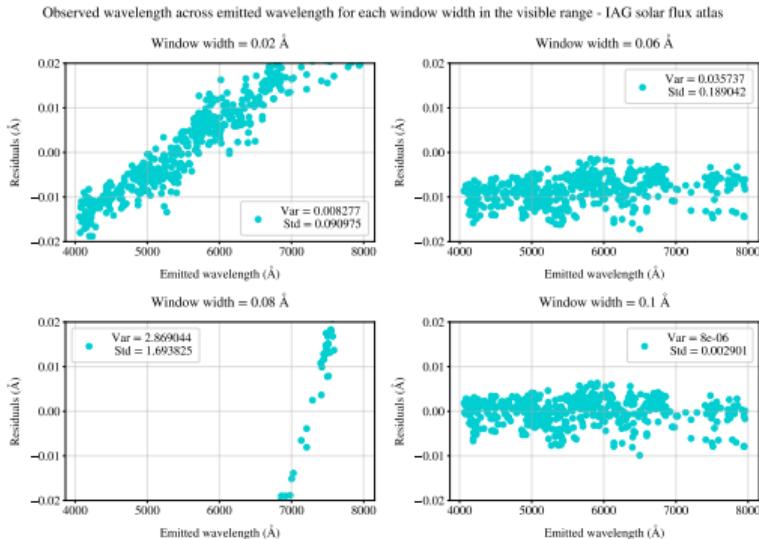
(a) Rango visible para el espectro del flujo solar IAG.



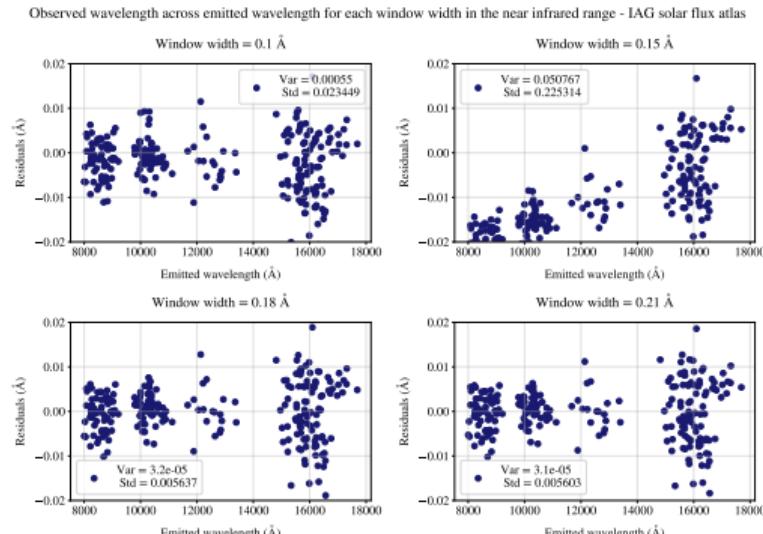
(b) Rango del infrarrojo cercano para el espectro del flujo solar IAG.

Figura 27: Varianza y desviación estándar para algunas longitudes de onda observadas alterando la ventana de observación para el ajuste polinomial de grado cuatro.

Variación en la ventana de observación



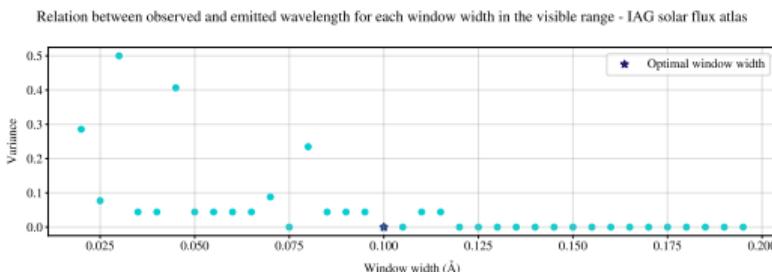
(a) Para ventanas de observación pequeñas del rango visible se puede observar un desplazamiento a lo largo de la longitud de onda emitida.



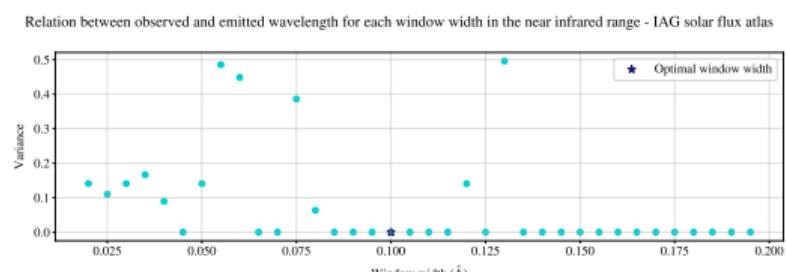
(b) Para ventanas de observación del rango del infrarrojo cercano no se observan desplazamientos pronunciados a lo largo de la longitud de onda emitida.

Figura 28: Gráficas para los residuales del ajuste lineal aplicado entre longitud de onda observada y emitida a lo largo de la longitud de onda emitida.

Para el rango visible se encontró que la ventana de observación mínima que asegura consistencia a lo largo de todo el rango espectral es de $0,1\text{ \AA}$. Para el rango del infrarrojo cercano se encontró que no hay mucha diferencia entre tomar distintas ventanas, por consistencia se utilizó la misma del rango visible.



(a) Para el rango visible la ventana de observación mínima que asegura consistencia a lo largo de todo el rango espectral es de $0,1\text{ \AA}$.



(b) Para el rango visible no se encuentra una diferencia pronunciada para escoger algún valor óptimo de ventana de observación.

Figura 29: Gráficas de varianza de los residuales para cada ventana de observación en el espectro de flujo solar IAG.

$$\text{CBS} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{b+c}{2} - a}{h} \quad (9)$$

Siguiendo con una expansión en series de Taylor...

$$f(c) = f(a) + (c - a)f'(a) + \frac{1}{2}(c - a)^2f''(a) + \frac{1}{6}(c - a)^3f'''(a) \dots \quad (10)$$

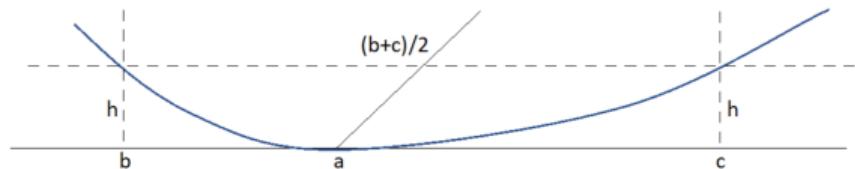


Figura 30: Ilustración para los puntos a , b , c y la altura que definen para la línea observada la relación de la tercera derivada.

La distribución de Maxwell-Boltzmann para velocidades atómicas es:

$$f(v_{\text{rad}}) = \exp\left(\frac{-mv_{\text{rad}}^2}{2k_B T}\right) \quad (11)$$

Su ancho σ^2 corresponde a la varianza térmica $\langle v_{\text{rad}}^2 \rangle = k_B T/m$. Combinando con el efecto Doppler, el perfil de línea resultante es:

$$f(\Delta\lambda) = L_D \exp\left(\frac{-mc^2}{2\lambda^2 k_B T} \Delta\lambda^2\right) \quad (12)$$

con L_D como profundidad de línea y $c\Delta\lambda/\lambda$ representando la velocidad radial.

La pendiente teórica $|f''(0)|\lambda^2/L_D$ se deduce del perfil de una distribución Gaussiana, obteniéndose para ensanchamiento puramente térmico:

$$\frac{|f''(0)|\lambda^2}{L_D} = \frac{mc^2}{2k_B T} \quad (13)$$

Generalizando para los tres efectos de ensanchamiento (térmico, rotacional y convectivo) considerados independientes, la pendiente teórica total es:

$$\frac{|f''(0)|\lambda^2}{L_D} = \frac{c^2}{\langle v_r^2 \rangle + \langle v_T^2 \rangle + \langle v_{\text{conv}}^2 \rangle} \quad (14)$$

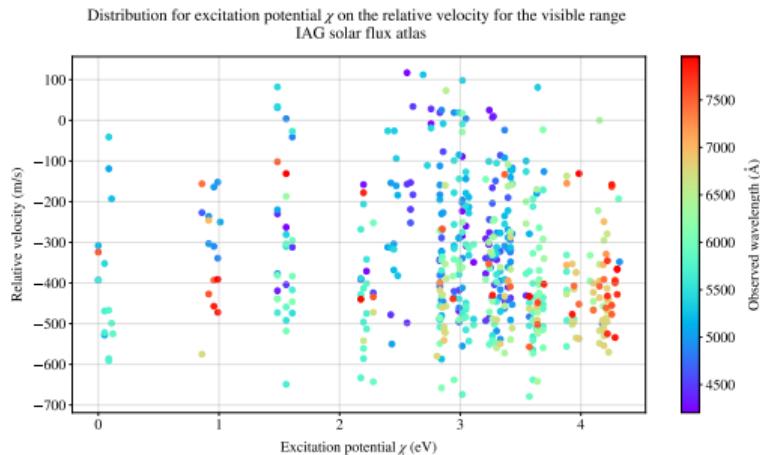
Usando la masa atómica del Fe (55,85 g/mol) y la temperatura efectiva solar (5770 K), se obtiene una varianza de velocidad térmica de $0,86 \text{ (km/s)}^2$.

La varianza de velocidad rotacional es $0,90 \text{ (km/s)}^2$, calculada mediante un modelo sólido y esférico del Sol.

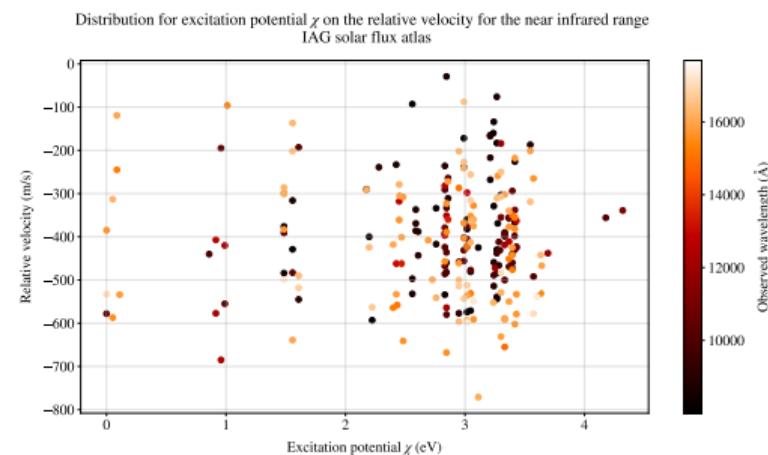
En el espectro del centro del disco solar IAG, el valor de $\langle v_r^2 \rangle$ es despreciable.

La lista de Nave para Fe I clasifica las líneas con un grado de calidad (A,B,C,D) basado en la incertidumbre de la longitud de onda.

- ★ Calidad A → incertidumbre menor a $0,005\text{cm}^{-1}$.
- ★ Calidad B → incertidumbre menor a $0,01\text{cm}^{-1}$.
- ★ Calidad C → incertidumbre menor a $0,02\text{cm}^{-1}$.
- ★ Calidad D → incertidumbre mayor a $0,02\text{cm}^{-1}$.



(a) Rango visible.



(b) Rango del infrarrojo cercano.

Figura 31: Velocidad relativa contra potencial de excitación (χ) del espectro de flujo solar IAG.

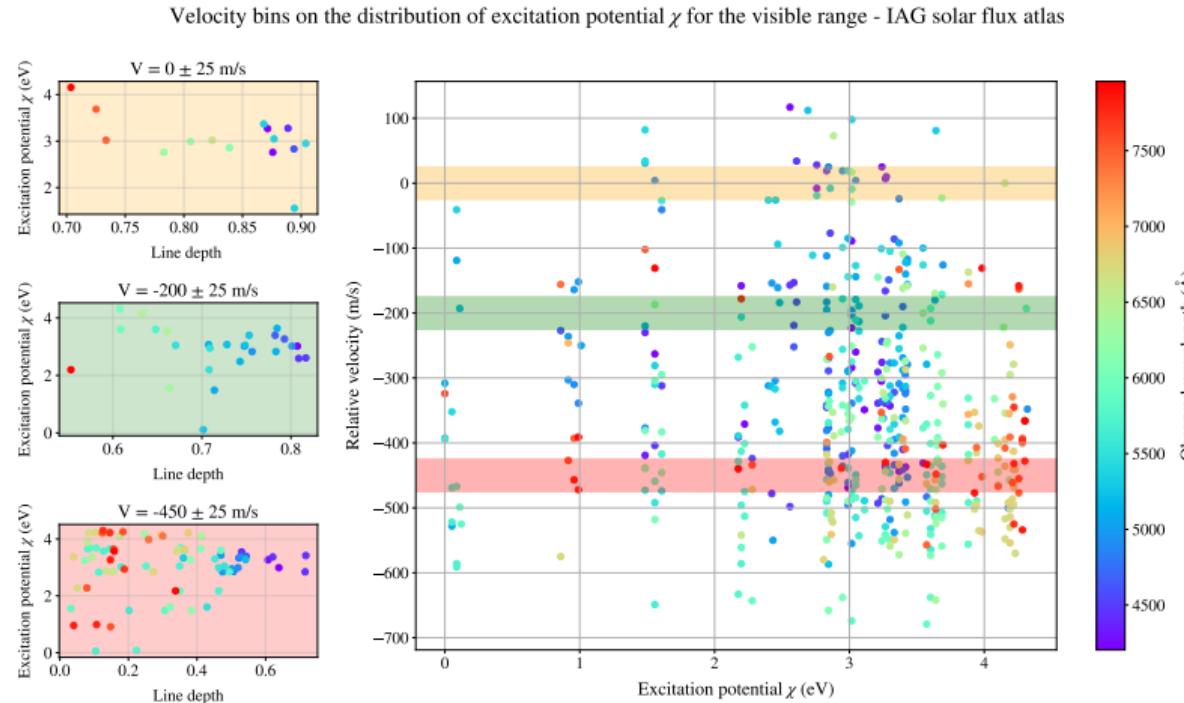


Figura 32: Secciones de velocidad de 100 m/s para el potencial de excitación de las longitudes de onda observadas para el rango visible del espectro de flujo solar IAG.

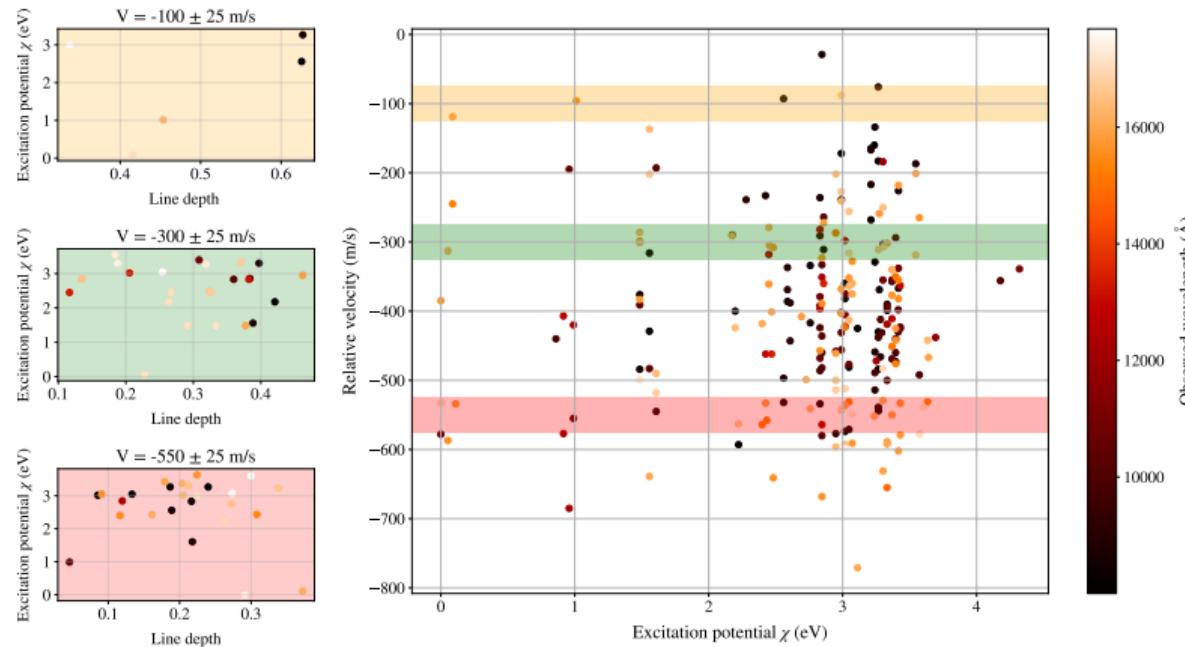
Velocity bins on the distribution of excitation potential χ for the near infrared range - IAG solar flux atlas

Figura 33: Secciones de velocidad de 100 m/s para el potencial de excitación de las longitudes de onda observadas para el rango del infrarrojo cercano del espectro de flujo solar IAG.

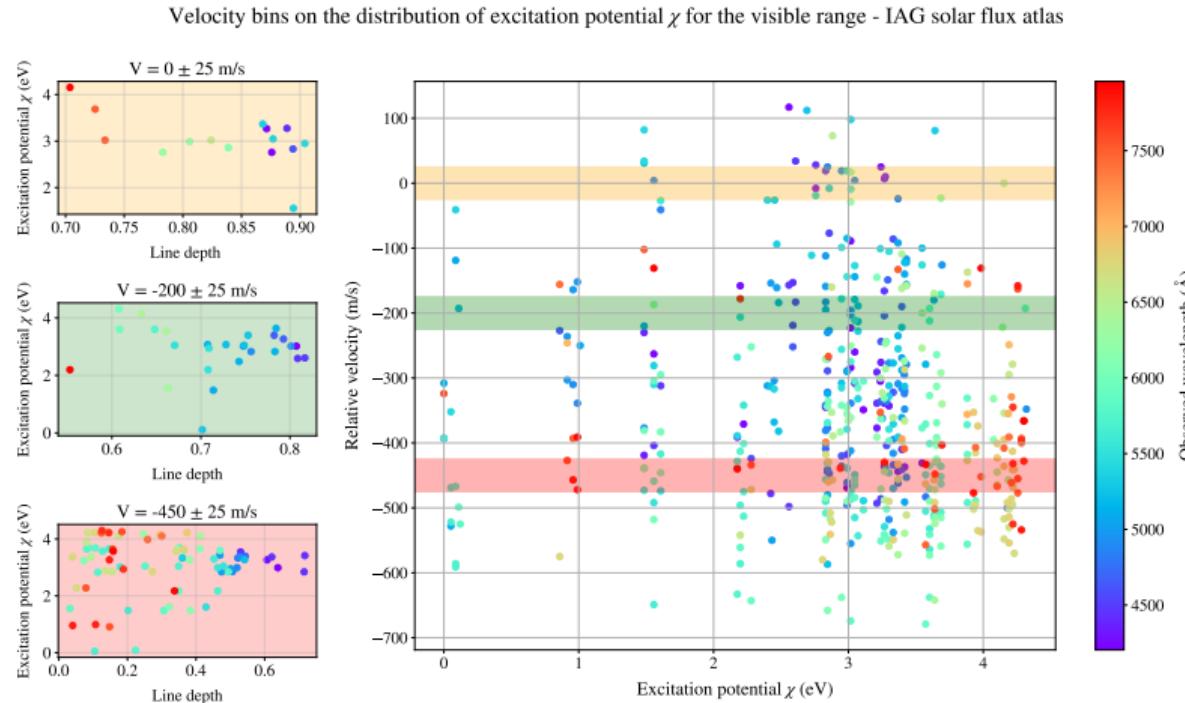
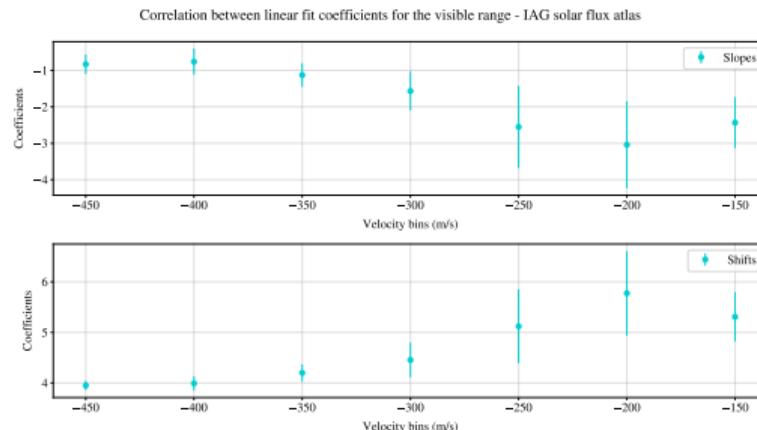
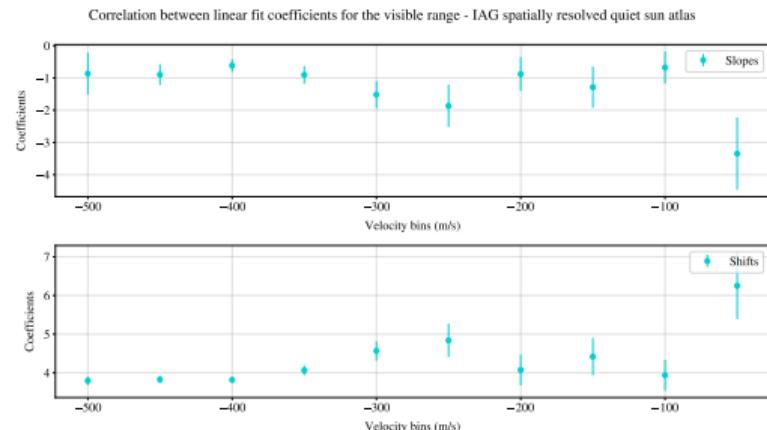


Figura 34: Secciones de velocidad de 100 m/s para el potencial de excitación de las longitudes de onda observadas para el rango visible del espectro del centro del disco solar IAG.



(a) Espectro del flujo solar IAG.



(b) Espectro del centro del disco solar IAG.

Figura 35: Coeficientes del ajuste lineal para cada sección de velocidad de ambos espectros, los valores muestran un incremento con la velocidad. En ambos espectros uno de los gráficos es el espejo del otro, esto es una consecuencia de la incertidumbre del ajuste.

En el rango de potencial de excitación (2,5 - 5,0) eV se muestra un desplazamiento máximo a los -200 m/s para el espectro de flujo solar IAG, y de 0 m/s para el espectro del centro de disco solar IAG. Sin embargo, la cromodependencia hallada no es un fenómeno pronunciado, por lo que se recomendaría no estudiar.

Para el proceso de selección de líneas de Fe I se creó un visualizador, utilizando la biblioteca Tkinter de Python, para ayudar a identificar líneas mezcladas o aquellas fuera del espectro.

Se crearon dos visualizadores con filtros distintos: El primero muestra la geometría del núcleo y perfil de la línea para preseleccionar líneas; el segundo, a partir de esa selección, visualiza los tres signos de convección junto con el ajuste realizado a cada línea observada.

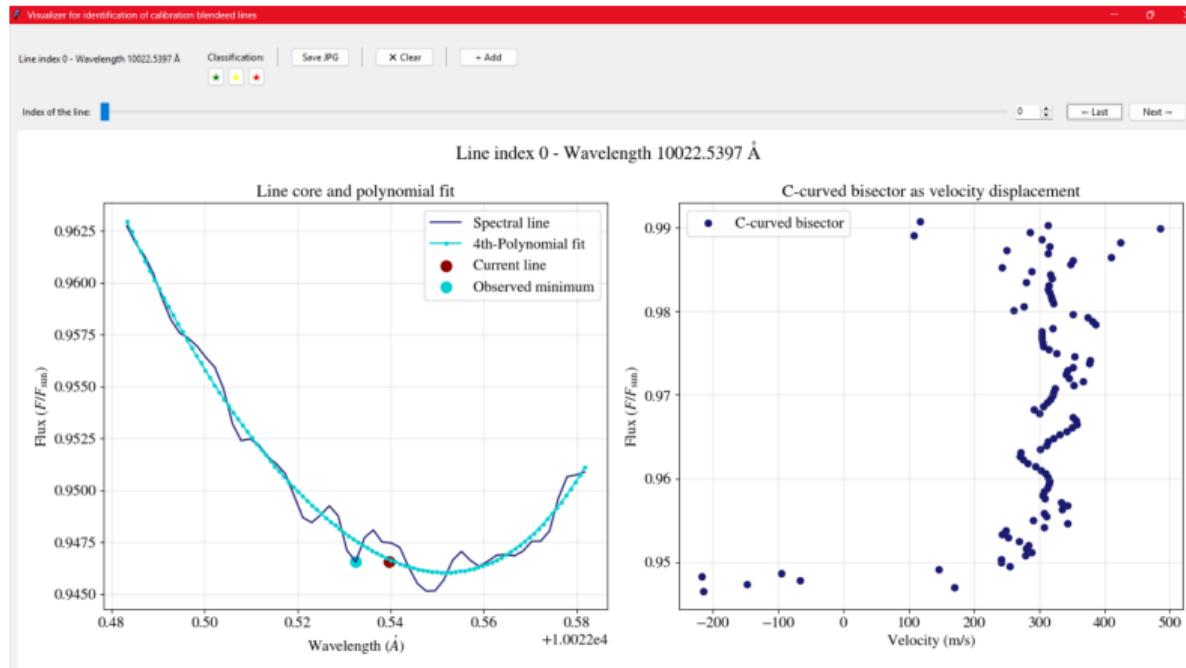


Figura 36: Vista general del visualizador para los resultados del primer filtro, donde se muestra el núcleo de la línea con su ajuste polinomial y la bisectriz del perfil de la línea.

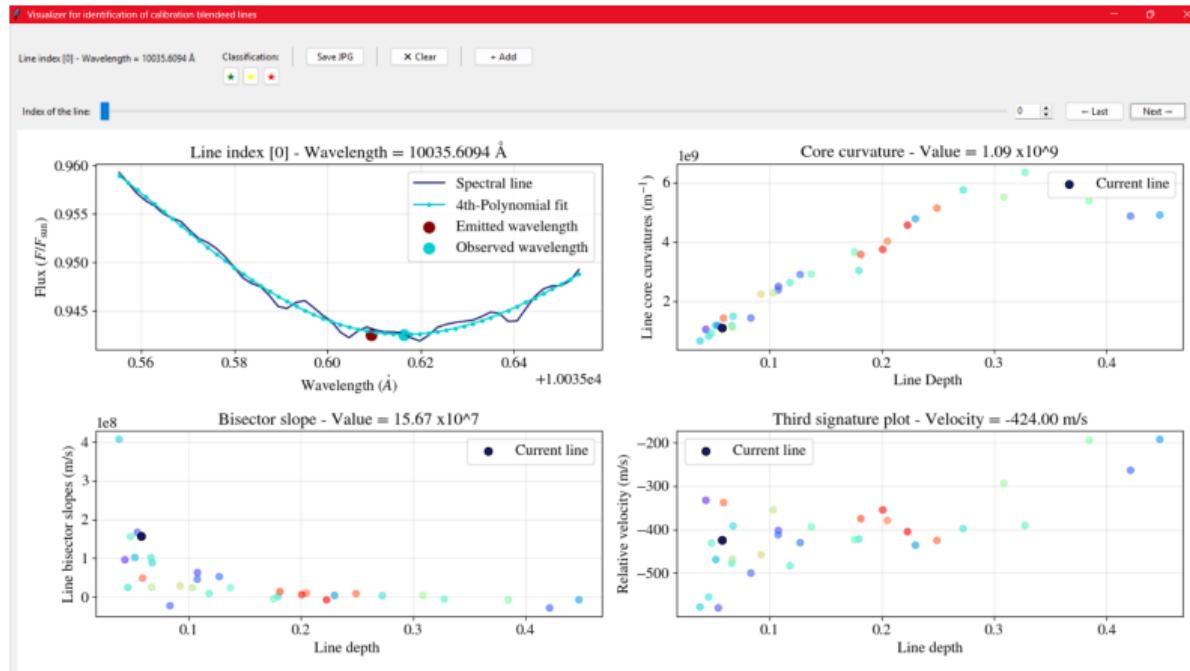


Figura 37: Vista general del visualizador para los resultados del segundo filtro, donde se muestran los tres signos de convección y el perfil de la línea espectral.

- [1] S. A. Hamouda, F. Alfarjani y F. Y. Elfituri, «Sunspots Production and Relation to Other Phenomena: A review», *International Journal of Science and Research Methodology*, jun. de 2018. dirección:
<https://ijsrm.humanjournals.com/sunspots-production-and-relation-to-other-phenomena-a-review/>
- [2] M. Ellwarth, B. Ehmann, S. Schäfer y A. Reiners, «Convective Characteristics of Fe I Lines Across the Solar Disc», en, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 680, A62, dic. de 2023, ISSN: 0004-6361, 1432-0746. dirección:
<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2023/12/aa47615-23/aa47615-23.html>
- [3] H. H. Plaskett, «Solar Granulation», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 96, pág. 402, mar. de 1936, ISSN: 0035-8711. dirección:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1936MNRAS...96..402P>

- [4] P. Foukal, *Solar Astrophysics*. Cambridge research e instrumentation, 1990, ISBN: 978-3-527-40374-5.
- [5] B. Carroll y D. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press, 2017, ISBN: 9781108422161. dirección:
<https://books.google.com.co/books?id=PY0wDwAAQBAJ>
- [6] S Dalal, R. D. Haywood, A Mortier, W. J. Chaplin y N Meunier, «Predicting convective blueshift and radial-velocity dispersion due to granulation for FGK stars», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 525, n.º 3, 3344–3353, ago. de 2023, ISSN: 1365-2966. dirección:
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stad2393>
- [7] D. Gray, «The Third Signature of Stellar Granulation», en, *The Astrophysical Journal*, vol. 697, n.º 2, pág. 1032, mayo de 2009, ISSN: 0004-637X. dirección:
<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1032>

- [8] «Chapter 1 - Fundamentals of Radiation for Atmospheric Applications», en *An Introduction to Atmospheric Radiation*, ép. International Geophysics, K. Liou, ed., vol. 84, Academic Press, 2002, págs. 1-36. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007461420280016X>
- [9] D. Hamilton y J. B. Lester, «A Technique for the Study of Stellar Convection: The Visible Solar Flux Spectrum», en, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 111, n.º 763, pág. 1132, sep. de 1999, ISSN: 1538-3873. dirección: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/316421/meta>
- [10] D. F. Gray y T. Pugh, «The Third Signature of Granulation in Bright-Giant and Supergiant Stars», en, *The Astronomical Journal*, vol. 143, n.º 4, pág. 92, mar. de 2012, ISSN: 1538-3881. dirección:
<https://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/143/4/92>

- [11] D. F. Gray y B. Oostra, «The Solar-Flux Third Granulation Signature», *The Astrophysical Journal*, vol. 852, pág. 42, ene. de 2018, issn: 0004-637X. dirección: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...852...42G>
- [12] G. Nave, S. Johansson, R. C. M. Learner, A. P. Thorne y J. W. Brault, «A New Multiplet Table for Fe I», *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 94, pág. 221, sep. de 1994, issn: 0067-0049. dirección:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994ApJS...94..221N>
- [13] A. Reiners, N. Mrotzek, U. Lemke, J. Hinrichs y K. Reinsch, «The IAG Solar Flux Atlas: Accurate Wavelengths and Absolute Convective Blueshift in Standard Solar Spectra», en, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 587, A65, mar. de 2016, issn: 0004-6361, 1432-0746. dirección:
<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2016/03/aa27530-15/aa27530-15.html>

- [14] E. Priest, *Solar Magnetohydrodynamics*. Kluwer, 1982, ISBN: 978-3-527-40374-5.
- [15] C. Allende Prieto y R. J. Garcia Lopez, «Fe I line shifts in the optical spectrum of the Sun», *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, vol. 129, págs. 41-44, abr. de 1998, ISSN: 0365-0138. dirección:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998AAS..129...41A>