

Introducción

La rotación del Sol es un fenómeno conocido desde 1611, descubierto por el astrónomo alemán Johannes Fabricius, al observar el movimiento de las manchas solares. Luego, Richard Carrington observó por casi 10 años las posiciones de las manchas solares, con el fin de medir la velocidad de rotación de algunas latitudes, sin poder lograrlo. Sin embargo, este trabajo fue la base para que científicos en años posteriores trataran de medir la rotación diferencial del Sol con éxito. Por consiguiente, se desarrolló una técnica mejorada, en la cual a partir de espectros de alta resolución se puede determinar la velocidad de rotación del Sol, por medio del efecto Doppler. Con el fin de medir dicha rotación, se tomaron espectros del borde del Sol, para encontrar cómo cambia la velocidad según la latitud. Por otro lado, la rotación diferencial del Sol se acopla a un modelo mejorado propuesto por Snodgrass y Ulrich, el cual se muestra a continuación.

$$\omega(\phi) = A + B \sin^2 \phi + C \sin^4 \phi$$

donde ω es la velocidad angular, ϕ es la latitud y las constantes son dadas por los polinomios de Gegenbauer y de los datos medidos.

Montaje Experimental

Para la toma de datos se usó el Espectrógrafo de Alta Resolución para Trabajos Astronómicos en Colombia (ESPARTACO), ubicado en el Observatorio Astronómico de la Universidad. El telescopio usado es un Meade LX 200, con un filtro Baader, el cual deja pasar solo la luz en el espectro visible y protege al telescopio de la luz del Sol. Además, se usó una fibra óptica de 50 μm , una cámara de video para observar el Sol y posicionar la fibra, y la unidad de acople de la misma. Se tomaron 143 espectros en Septiembre 27 de 2016, entre las 2:40 y 4:13 pm, en un rango de longitud de onda de $[6277,6312] \text{ \AA}$, ya que en esta zona hay gran abundancia de líneas atmosféricas junto con algunas del Sol. Estas líneas atmosféricas son útiles para la calibración de la longitud de onda del espectro. Cada espectro se tomó con un tiempo de exposición de 0,5 s, para evitar saturación. Además, por cada espectro que se tomó, se midió su Ascensión Recta y Declinación, según las reportaba el telescopio. Adicionalmente, se tomaron 7 imágenes oscuras que se usaron para disminuir el nivel del ruido en los espectros.

Metodología

Procesamiento inicial de los espectros

Para procesar los espectros se usó el programa IRIS. Se realizaron correcciones de ruido (a) e inclinación. Posteriormente, se realizó suma de los dos renglones de máxima intensidad del espectro (b), se aplicó un filtro Gaussiano para obtener un modelo de espectro continuo (c) y se dividió este último por el espectro obtenido en (b).

(a)



(b)



(c)



Figura 1. Pasos en el procesamiento de los espectros.

Cálculo de velocidades de rotación - Aproximación computacional

Para analizar los espectros, se usó una aproximación continua para estos, usando la función spline de scipy, la cual lleva a cabo una interpolación de los puntos discretos y genera una curva diferenciable al ser definida polinómica a trozos. En este caso se usó un polinomio de orden 4, para predecir de mejor manera el comportamiento del perfil de intensidad. Luego, se calcularon la 1ra y 2da derivada, para encontrar los máximos, como se muestra en la Figura 2.

La Figura 3, muestra la identificación de líneas espectrales efectuada por el programa.

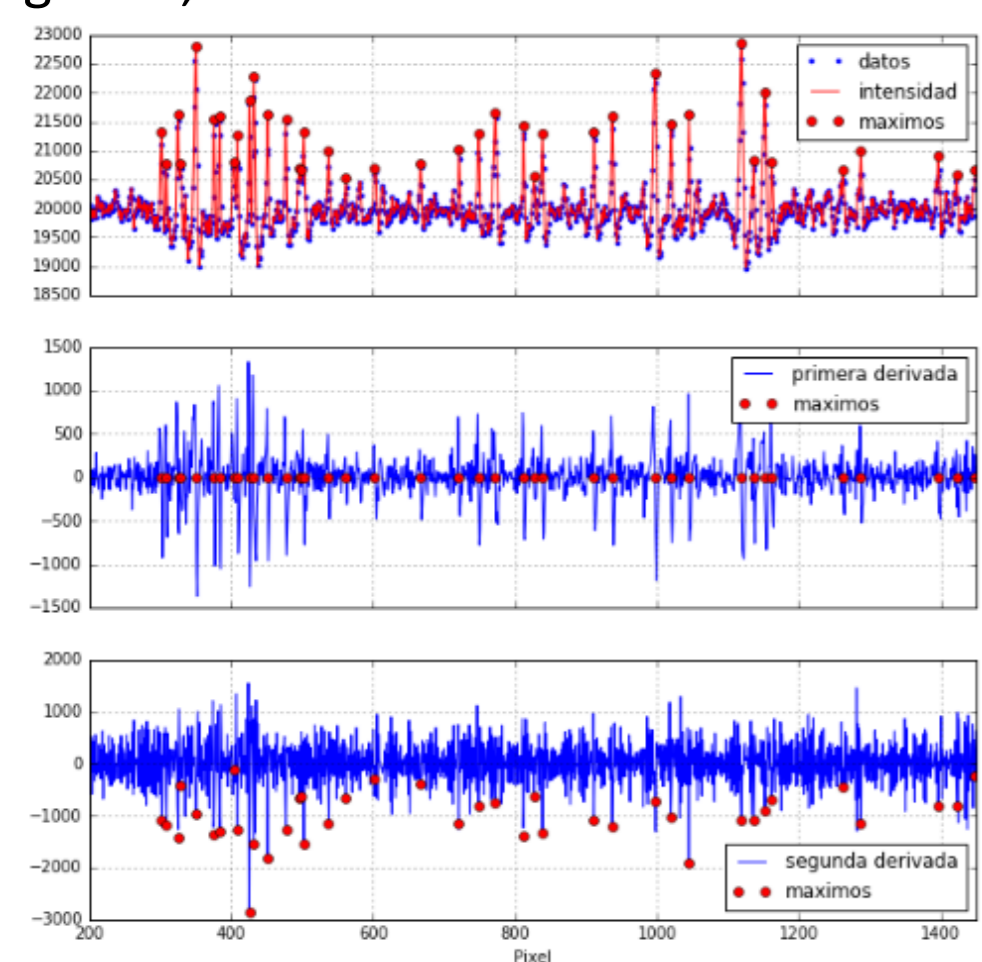


Figura 2. Perfil de intensidad vs. píxel con aproximación de spline de orden 4, junto con sus dos primeras derivadas y máximos identificados.

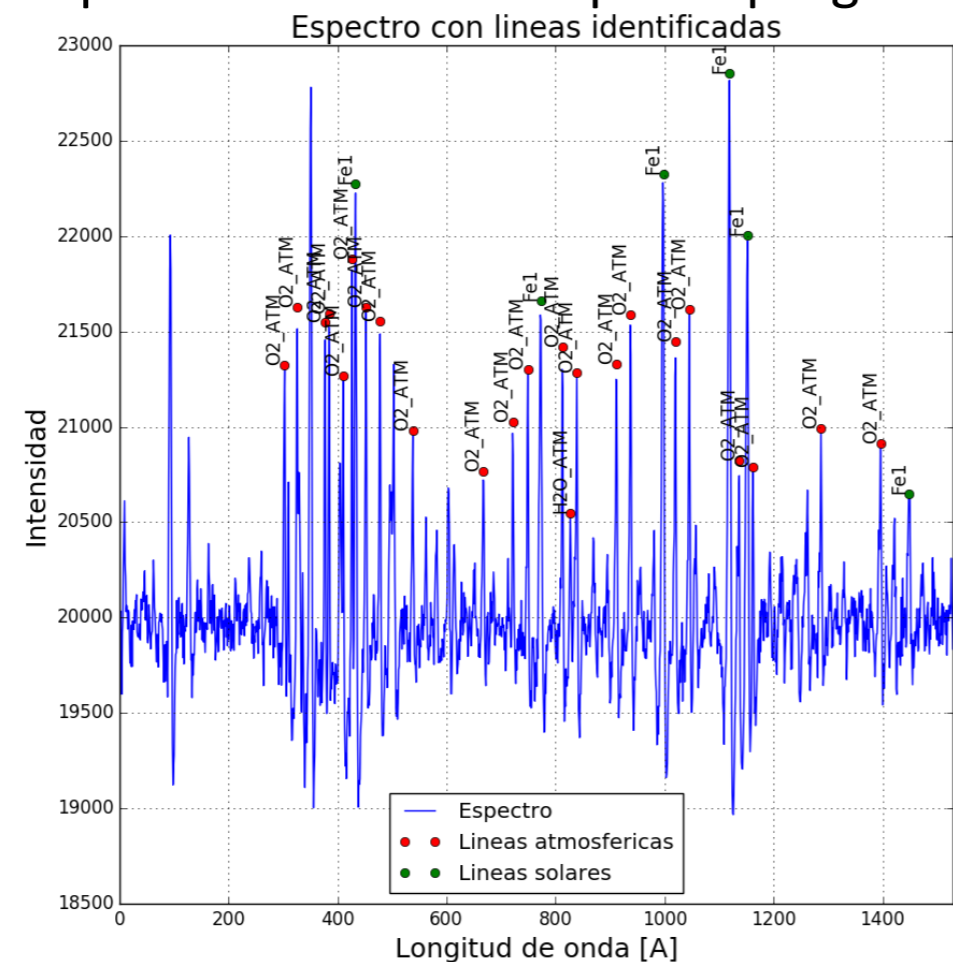


Figura 3. Espectro con líneas de absorción identificadas con el código en Python.

Cálculo de velocidades de rotación - Aproximación manual

A partir de los píxeles con mayor intensidad, se puede suponer un comportamiento parabólico en la vecindad de los puntos. Esto significa que el píxel donde estaría el máximo de intensidad estaría definido como:

$$px^* = px_{max} + \frac{1}{2} \left(\frac{I(px_{max-1}) - I(px_{max+1})}{I(px_{max-1}) + I(px_{max+1}) - 2I(px_{max})} \right)$$

Donde px^* es nuestro píxel buscado, px_{max} es el píxel donde hay un máximo de intensidad, I denota la intensidad del espectro y los subíndices $max+1$ y $max-1$ se refieren a los píxeles siguiente y anterior a dicho máximo, respectivamente.

Resultados

Corrección de coordenadas

Se realizaron las correcciones de Ascensión Recta y Declinación para compensar el movimiento aparente del Sol durante las horas de observación. Para esto, se usaron los datos del Hong Kong Observatory, lo cual permitió encontrar la tasa de cambio de dichas variables en el día de la toma de datos. A partir de las correcciones y simulando el tamaño del Sol, se encontró el ángulo de posición para cada espectro.

Cálculo y corrección de velocidades

Se calcularon las velocidades de las líneas solares y telúricas de cada espectro, a partir de la ecuación de efecto Doppler. Al promedio de velocidades del Sol, se le realizaron correcciones por la velocidad reportada por las líneas telúricas, y velocidad de rotación y traslación de la Tierra. La figura 4 muestra el perfil de velocidades obtenido.

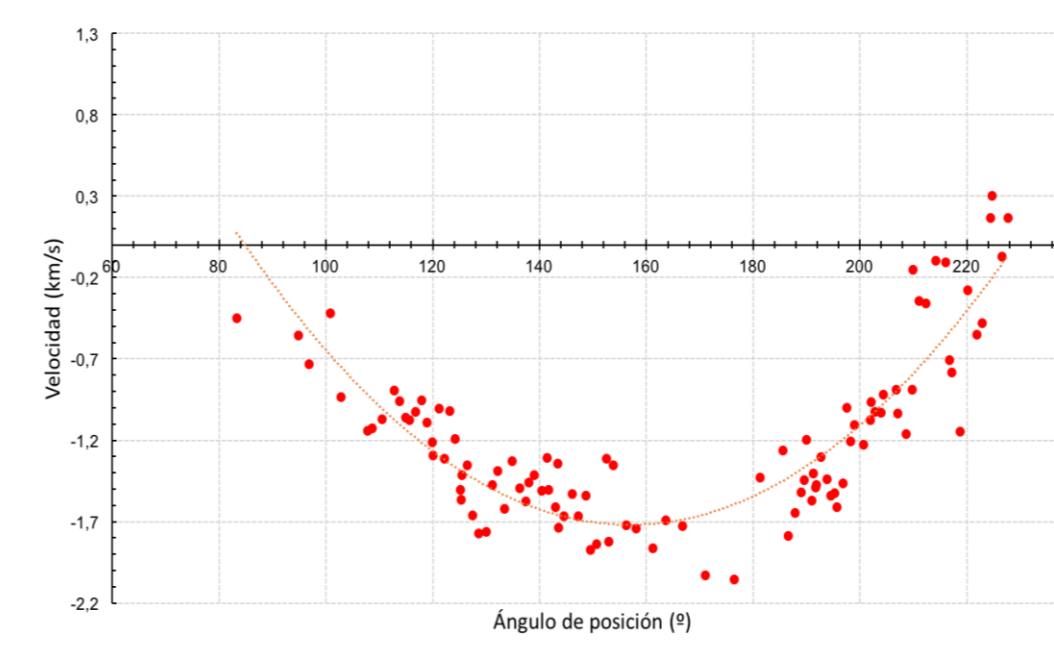


Figura 4. Regresión polinómica para encontrar el Ecuador Solar.

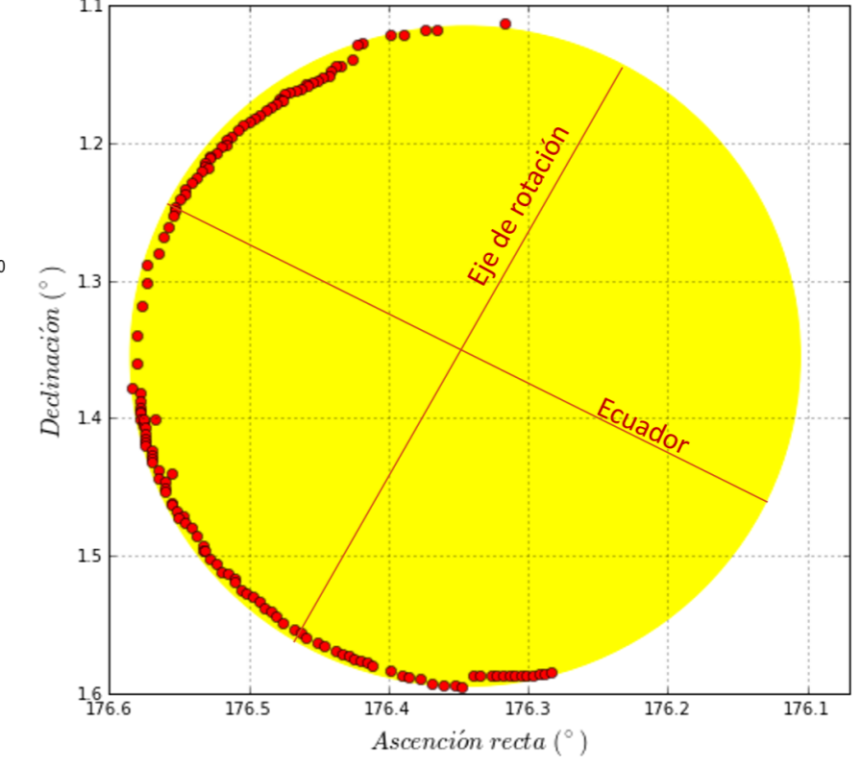


Figura 5. Posición del Ecuador y Eje de rotación Solar, junto con la posición de los espectros tomados, representados por un punto.

Determinación del Ecuador Solar

Se llevó a cabo una regresión polinómica a los datos de velocidad de la Figura 4, usando solo los datos mostrados en la Figura 5. Al derivar la ecuación de interpolación, se encontró el mínimo de velocidad, el cual corresponde a la posición del Ecuador. El valor medido fue de 157° , cercano al teórico de 155° para la fecha de observación. Adicionalmente, se calculó el eje de inclinación de rotación del Sol, obteniendo un valor de 23° . El valor teórico es aproximadamente 25° . La Figura 6 muestra las posiciones del Ecuador y eje de rotación solar, junto con la posición de los espectros tomados según su latitud.

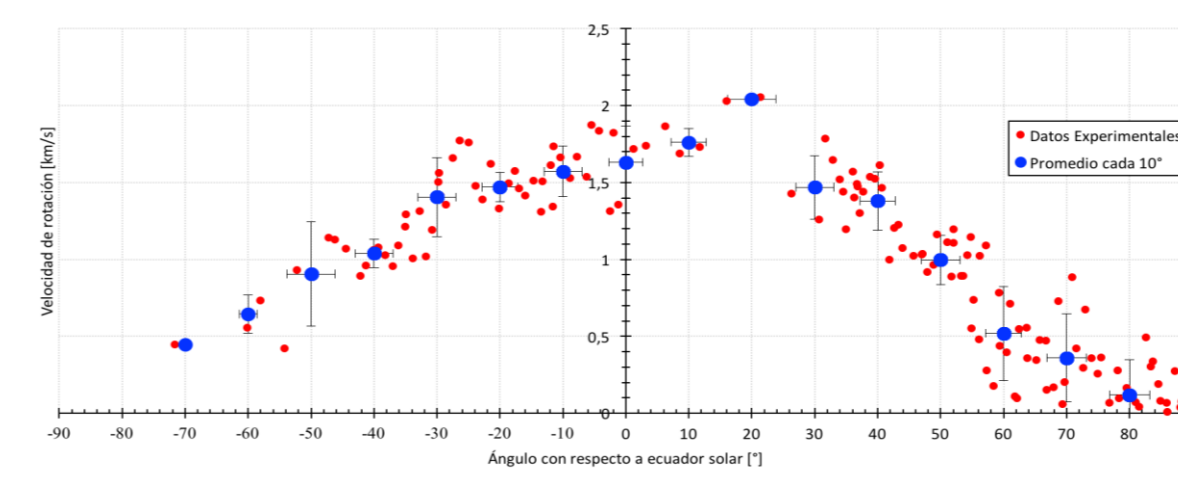


Figura 6. Perfil de velocidades con respecto a latitud solar. Ser incluyen promedio cada 10° de latitud.

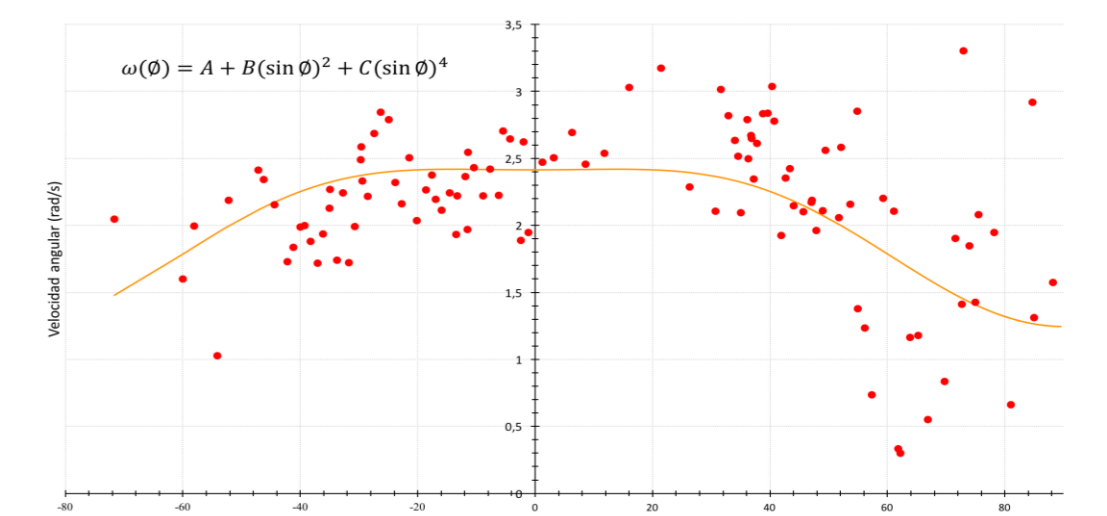


Figura 7. Perfil de velocidades angulares con respecto a latitud solar. Línea con ajuste teórico con constantes $A = 2,44$; $B = 0,90$; $C = -4,86$.

Velocidades y periodos de rotación en coordenadas solares

Con la información del Ecuador Solar y el perfil de velocidades de cada uno de los espectros se puede construir entonces el perfil de velocidades según latitud solar. Este diagrama se encuentra en la Figura 6. Se obtiene un comportamiento de acuerdo a lo reportado en la literatura, con mayor velocidad en el ecuador y menor en los polos. Con estas velocidades se puede finalmente calcular el perfil de velocidades angulares con respecto a la latitud, e intentar ajustar el modelo teórico de Snodgrass y Ulrich. En el Ecuador se obtuvo una velocidad de $1,63 \pm 0,23 \text{ km/s}$ y un periodo de $28,1 \pm 1,07 \text{ días}$. En los polos se obtuvo un periodo de rotación de $39,28 \pm 17,39 \text{ días}$.

Errores asociados

La descalibración de ESPARTACO y la nubosidad el día de la toma de datos influyeron en los espectros, al ensanchar algunas líneas espectrales y afectar su forma. Esto provocó la dispersión en las velocidades radiales y angulares, en el periodo de rotación de cada latitud del Sol y en los coeficientes del modelo teórico. Cerca a los polos las funciones trigonométricas divergen causando esos errores considerables en dichas latitudes.

Conclusiones

- Ser presenta la observación y el procesamiento de 143 espectros en el borde del sol utilizando el observatorio de la Universidad de los Andes.
- Ser propusieron 2 aproximaciones para el procesamiento, computacional y manual. La aproximación manual resultó se la más útil para el procesamiento de estos espectros dada la calidad de los mismos.
- Ser pudo identificar el Ecuador solar con un ángulo de 155° , el cual presenta un error de solo 2° con respecto a la literatura.
- Ser encontraron los parámetros de ajuste del modelo teórico de velocidad angular contra latitud solar, mostrando tener valores del mismo orden de magnitud que los encontrados por Snodgrass y Ulrich.
- Estos resultados son sorprendentes dada la calidad de espectros obtenidos, donde hubo una descalibración durante el tiempo de medición que afectó los resultados acá reportados.
- La aproximación computacional del procesamiento de espectros demuestra un gran potencial para futuros trabajos.
- Este tipo de trabajos resultan desde el punto de vista de manejo de equipos, procesamiento de datos y exposición de resultados herramientas útiles para cualquier estudiante de astrofísica.

Referencias

1. Johannes Fabricius. de maculis in sole observatis et appa-rente earum cum soleconversione, narratio. 1611.
2. Richard Carrington. Observations of the spots on the sunfrom november 9, 1853, to march 24, 1861, made at redhill.1861.
3. Barbara J Becker,John B. Hearnshaw. The Analysisof Starlight: Two Centuries of Astronomical Spectroscopy,Isis, 106(4):953–954, 2015.
4. C. E. Moore, M. G. J. Minnaert, and J. Houtgast.The solarspectrum 2935 A to 8770 A. 1966.
5. Herschel Snodgrass and Roger Ulrich. Rotation of dopplerfeatures in the solar photosphere.Astrophysical Journal,351:309–316, 1990.
6. ObservatorioAstronómico de la Universidad de los Andes. Espectrógrafo ESPARTACO. http://observatorio.uniandes.edu.co/index.php/instrumentacion/espataco, 2013. [Acceso en Agosto 28,2016].
7. T Greville. Numerical procedures for interpolation by splinefunctions.Journal of the Society for Industrial and AppliedMathematics: Series B, Numerical Analysis, 1:53–68, 1964
8. Hong Kong Observatory. The apparent right ascension and apparent declination of the sun. http://www.hko.gov.hk/prtver/html/docs/gts/astron2016/sun_ra_dec_2016_e.shtml.
9. Jürgen Giesen. Solar rotation applet. http://www.jgiesen.de/sunrot/index.html