

# SUNSPOTCALC: Una aplicación Web para calcular la rotación diferencial del Sol

D. Sierra-Porta

*Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Tecnológica de Bolívar,  
Parque Industrial y Tecnológico Carlos Vélez Pombo Km 1 Vía Turbaco, Cartagena 130010, Colombia.  
e-mail: dporta@utb.edu.co  
orcid: 0000-0003-3461-1347*

D. D. Herrera Acevedo

*Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Bolívar,  
Parque Industrial y Tecnológico Carlos Vélez Pombo Km 1 Vía Turbaco, Cartagena 130010, Colombia.  
orcid: 0000-0002-2060-7040*

M. Tarazona-Alvarado

*Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Car 27 #9 Bucaramanga 680001, Colombia.  
orcid: 0000-0001-9935-1094*

Y. P. Hernández Díaz

*Área de Básicas Exactas, Universidad del Sinú, Seccional Cartagena, Cartagena 130014, Colombia.  
orcid: 0000-0002-9540-925X*

Received 27 February 2023; accepted 22 April 2023

En este manuscrito presentamos una aplicación web con soporte en lenguaje de programación PYTHON, REACTJS y JAVASCRIPT, libre y abierta, para el desarrollo de una actividad de enseñanza-aprendizaje de la astronomía, específicamente para el cálculo de la rotación diferencial del Sol para estudiantes y público en general en edad escolar entre 10 y 18 años. El propósito fundamental es la de difundir el conocimiento del Sol y algunas de sus propiedades. La aplicación web es autocontenida y con suficiente guía y ayuda para que cualquiera pueda usarla, además de su dinamismo y diseño innovador, pretende presentar estrategias agradables para la enseñanza y aprendizaje de la ciencia en torno al Sol.

*Descriptores:* Rotación diferencial del sol; manchas solares; divulgación científica; ciencia de datos.

In this manuscript we present a web application with support in PYTHON, REACTJS and JAVASCRIPT programming language, free and open, for the development of a teaching-learning activity of astronomy, specifically for the calculation of the differential rotation of the Sun for students and general public in school age between 10 and 18 years old. The main purpose is to spread the knowledge of the Sun and some of its properties. The web application is self-contained and with enough guidance and help for anyone to use it, in addition to its dynamism and innovative design, it aims to present pleasant strategies for teaching and learning science around the Sun.

*Keywords:* Differential Sun's rotation; sunspots; scientific outreach; data science.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.20.020208>

## 1. Introducción

### 1.1. Rotación diferencial del Sol

El Sol tarda poco menos de un mes en girar completamente, el fenómeno que conocemos como la rotación diferencial del Sol indica que gira más rápido en el ecuador que en los polos. Desde el siglo XVII, los astrónomos han monitoreado el movimiento de las manchas solares sobre el disco solar, pudiendo de este modo medir la tasa de rotación del Sol a diferentes puntos de su superficie. Estas observaciones permitieron identificar que la rotación del Sol varía con la latitud local helioesférica. Esto sucede porque el Sol no es un cuerpo sólido sino un plasma, que no rota a la misma velocidad angular en todos sus latitudes o áreas a diferentes distancias desde su ecuador, es decir, no es extrapolable del caso de la rotación de la Tierra. En otras palabras, algunas veces es posible observar una región grande y activa de manchas solares que, dependiendo de su posición en el disco solar, puede no-

tarse a simple vista, algunas veces con la ayuda de oculares y filtros adecuados, que esta se mueve lentamente por el disco solar.

Esta rotación diferencial del Sol obedece a varias fuentes, causas y consecuencias. Wiegmann y otros (2014) [1] plantea varios métodos y explicaciones para la rotación diferencial del Sol que tienen que ver con algunos mecanismos de transportes de flujos de campos magnéticos en la superficie solar, más específicamente en la fotosfera. Según Georgoulis y otros (2009) [2], aproximadamente el 20 % de la helicidad magnética total inyectada se debe a la rotación diferencial, mientras que la fuente principal de inyección proviene de los flujos de plasma dentro de las regiones activas. Esto coincide con investigaciones previas que indican que la cantidad de helicidad inyectada por la rotación diferencial en las regiones activas puede oscilar entre el 10 % y el 50 % de la cantidad inyectada por los movimientos dentro de las propias regiones activas ([3] y las referencias allí encontradas).

Más recientemente, Moradi y otros (2010) [4] muestra que existen dos teorías principales sobre la estructura interna de las manchas solares: el modelo monolítico y el modelo de cúmulos, y asegura que para investigar la estructura subfotosférica, la heliosismología local es el único medio disponible, toda vez que aunque las manchas solares se observan fácilmente en la superficie solar, determinar su estructura subsuperficial no es trivial [5].

El campo magnético es la característica central que determina las propiedades de las manchas solares. Este campo se extiende por todas las partes de una mancha solar y es el responsable último de la oscuridad de las manchas solares, ya que reduce significativamente el transporte convectivo de calor desde abajo de la superficie del Sol. Por otro lado, las manchas solares fueron los primeros objetos astronómicos en los que se reconoció la presencia de un campo magnético, gracias a Hale (1908) [6] (también en [7]).

Existen diversos modelos de manchas solares que pretenden reproducir sus propiedades observadas o comprender los procesos físicos que tienen lugar en ellas. Además de los modelos empíricos, se pueden distinguir cuatro clases de modelos teóricos. En primer lugar, están los experimentos numéricos, que son simulaciones idealizadas de algún proceso físico, como la magnetoconvección, que se cree que actúa en la característica magnética [8, 9], las cuales son pequeños elementos magnéticos que se alejan casi radialmente de las manchas solares hacia el límite de las regiones de foso. Se observan sobre todo durante la fase de desintegración de una mancha solar. La segunda clase se compone de descripciones estáticas de flujos en geometrías simétricas triviales que pretenden reproducir las propiedades globales observadas de las manchas solares intentando descripciones y resultados de cierto realismo físico, esto minimizan los tiempos computacionales de cálculos. La tercera clase se compone de descripciones simplificadas de fenómenos dinámicos en (o alrededor de) las manchas solares. Por último, están las simulaciones completas, que incluyen la dependencia del tiempo, la compresibilidad, la ionización parcial, la transferencia radiativa e, idealmente, 2 o 3 dimensiones, una malla espacial y temporal fina y un dominio computacional suficientemente grande lo cual implica necesariamente la posibilidad de recursos computacionales más grandes, óptimos, poderosos y numerosos. Para una revisión de estos modelos puede verse la referencia [10].

Como lo indica Stix y otros (1989) [11], el propósito de todos los modelos es no sólo explicar la rotación que se observa en la superficie del Sol, sino también predecir cómo es la velocidad angular en la zona de convección. Sin embargo, sólo algunos de los modelos han logrado tener éxito en este aspecto.

En relación a las manchas solares, algunos otros efectos sutiles incluyen cambios en la textura de la superficie y las formas de las regiones activas. Efectos bastante más críticos y dramáticos incluyen numerosos fulguraciones de las regiones activas (que interactúan con las manchas solares) y prominencias visibles en todo el borde del Sol.

## 1.2. Dinámica solar, observatorios y manchas oscuras

Las manchas solares [10, 12] no son más que regiones o parches oscuros en la superficie del sol, vistos a simple vista con un telescopio, incluso pequeño, con un apropiado filtro solar. La fotosfera es justo la región en la que se originan estas manchas que se pueden diferenciar rápidamente del resto de la superficie del Sol. La física básica fototérmica nos hace ver que dichas manchas son oscuras debido principalmente a que éstas regiones se encuentran por lo menos 1000 K más frías que el resto de la superficie que oscila entre 6500 K y 4000 K. Por otro lado, algunas de estas manchas lucen súper grandes otras más pequeñas casi imperceptibles. El tamaño de las manchas oscuras también oscila entre 16 km a 160.000 km (ver Fig. 1), de hecho algunas pueden ser visibles desde la Tierra sin el uso de telescopios (pero usando filtros adecuados y apropiados), algunas son tan grandes como toda la esfera de Júpiter (ver Fig. 1).

Además de esto, el número de manchas solares o manchas oscuras en la superficie del Sol suele variar de manera estacionalmente en el tiempo en periodos que llamamos ciclos solares que tienen una duración de aproximadamente 11 años, teniendo épocas de muchas actividad solar, lo que provoca la aparición de muchas manchas solares y otros periodos en el que el número de manchas solares es mínimo [13–16].

El Sol además, a diferencia de la tierra, posee campos magnéticos (locales) muy complicados e inestables que varían mucho en el tiempo. Los campos magnéticos de las manchas solares son muy complejos y dinámicos. Se produ-

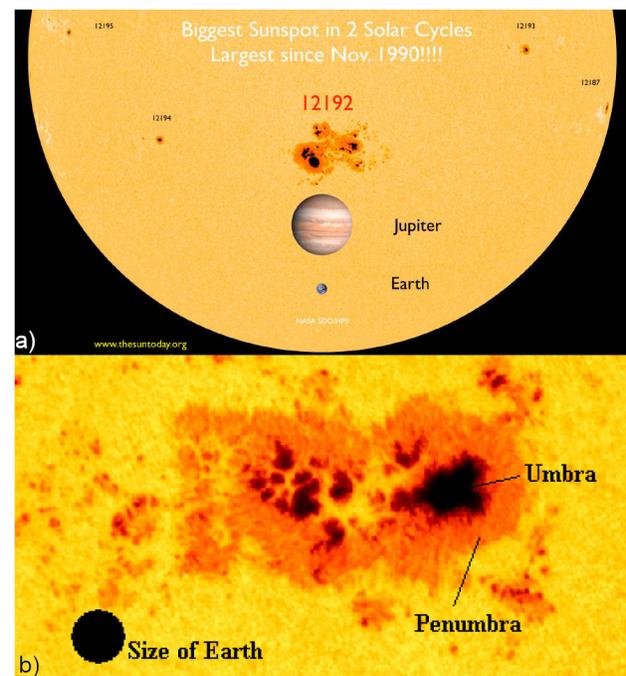


FIGURE 1. a) El 23 de octubre de 2014, AR12192 fue la mayor mancha solar en 2 ciclos solares<sup>1</sup>. b) Se muestra un gran grupo de manchas solares, con los componentes principales, umbra y penumbra, indicados. Imagen cortesía del consorcio SOHO/MDI.

cen por la interacción del movimiento convectivo de las capas externas del Sol con los campos magnéticos que existen en su interior. Estos campos magnéticos son generados por un proceso denominado dinamo solar, impulsado por el movimiento de partículas cargadas en el plasma ionizado del Sol.

Dentro de una mancha solar, los campos magnéticos están muy concentrados y pueden ser varios miles de veces más intensos que el campo magnético medio de la superficie del Sol. Las líneas de campo magnético dentro de una mancha solar están contorsionadas, formando bucles que se originan en capas inferiores de la superficie solar y se extienden a través de las capas exteriores del Sol, en general de forma toroidal y poloidal.

Los intensos campos magnéticos de una mancha solar pueden inhibir el movimiento convectivo del plasma, lo que provoca un efecto de enfriamiento localizado. Este efecto de enfriamiento hace que la temperatura dentro de una mancha solar sea inferior a la de las zonas circundantes, lo que hace que la mancha solar aparezca oscura frente al fondo brillante de la fotosfera del Sol.

Los campos magnéticos de las manchas solares también pueden volverse muy inestables y provocar erupciones solares y eyecciones de masa coronal. Estas erupciones pueden producir intensos estallidos de radiación y partículas cargadas que pueden tener importantes repercusiones en la ionosfera y los sistemas tecnológicos de la Tierra [17, 18].

Llamamos periodo de rotación de un objeto al tiempo que tarda en dar una vuelta entorno a su eje. En el caso del Sol podemos deducir su valor midiendo cuánto tiempo tarda una mancha solar en recorrer cierta distancia sobre su superficie; o en el número de grados recorrido (en longitud), teniendo en cuenta que una rotación completa (una vuelta) son 360 grados.

El Sol es estudiado intensamente a partir de diferentes observatorios y telescopios especializados tanto en tierra como en sondas y satélites desarrollados para este fin usando diferentes tecnologías y en un amplio rango de longitudes de onda. Algunos de estos observatorios ópticos (los más recientes) incluyen: Upgraded Coronal Multi-Channel Polarimeter (UCoMP, 2021, apertura de 20 cm, Mauna Loa, Hawaii, United States) [19, 20]; Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST, 2019, apertura de 400 cm, Haleakala, Maui, Hawaii, United States) [21, 22]; Chinese Large Solar Telescope (CLST, 2019, apertura de 180 cm, Chengdu, Sichuan, China) [21, 23]; GREGOR, Teide Observatory (2012, apertura de 150 cm, Tenerife, Spain) [24, 25]; entre otros. También los radiotelescopios entre los que se encuentran el Chinese Spectral Radioheliograph (CSRH, 2013, 0.4-2.0 GHz, 2.0-15 GHz, Inner Mongolia, China) [26, 27] y el Polarization Emission of Millimeter Activity at the Sun (POEMAS), Complejo Astronómico El Leoncito (2011, 45 and 90 GHz, San Juan Province, Argentina) [28]. Adicionalmente, las sondas exitosas y de referencia mundial como el Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) [29, 30], el Explorer 50 (IMP-8) [31], Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) [32, 33], y los más recientes el Solar Orbiter [34],

Parker Solar Probe (PSP) diseñado para realizar mediciones rápidas del plasma térmico coronal y del viento solar [35, 36] y Ionospheric Connection Explorer (ICON) [37].

Muchos de estos telescopios en tierra o sondas espaciales disponen de datos en tiempo real y libres para que investigadores y científicos ciudadanos en todo el mundo tengan acceso a los mismos y puedan analizarlos desde diferentes puntos de vistas o estrategias.

### 1.3. Midiendo la rotación diferencial del Sol

Comenzando el año 1630, Christoph Scheiner (físico y astrónomo, vea por ejemplo: <http://galileo.rice.edu/sci/scheiner.html>) notó que las manchas oscuras cerca del ecuador atravesando el disco solar se movían más rápido que aquellas que se encontraban cerca de los polos, de igual manera que Carrington usó justamente un seguimiento de estas manchas solares para hacer la primera medición de la rotación diferencial del Sol.

Existen muchos métodos que se han desarrollado para medir la rotación diferencial del Sol. Aunque determinar la tasa de rotación solar puede parecer una tarea sencilla, en realidad hay discrepancias en las observaciones que se han llevado a cabo durante más de un siglo, como se ha reportado en estudios previos (por ejemplo [38, 39]), la velocidad de la rotación depende de los métodos y datos utilizados.

Beck y otros (2000) [40] expone cuatro métodos distintos que se usan para tal fin con el fin de hacer comparaciones de los resultados de todas estas versiones. Particularmente usando datos comunes, encuentra que las mediciones son consistentes en un margen de error del 5 %, sin embargo, se pueden observar patrones significativos en las variaciones. Por ejemplo, las mediciones espectroscópicas de la rotación del plasma a partir de los desplazamientos Doppler de las líneas espectrales fotosféricas [41–43] muestran consistentemente valores más bajos que las mediciones utilizando trazadores de manchas solares [44, 45].

Por su parte, más recientemente, Lamb y otros (2017) [46] demuestra que es posible obtener mediciones altamente precisas en un corto periodo de tiempo mediante el seguimiento de los movimientos de características individuales en magnetogramas fotosféricos. Además, de resultar un proceso relativamente fácil de automatizar, sugiere que se pueden obtener mediciones de velocidad fotosférica residuales de mayor resolución y sin promediar longitudinalmente.

### 1.4. ánimos y objetivos de este manuscrito

La física solar es interesante y además dado que el Sol es la estrella más cercana a la tierra definitivamente se convierte en un laboratorio importante para el desarrollo de competencias en ciencias y astronomía. Incluso a nivel de educación básica es una buena oportunidad para reforzar, afianzar y obtener competencias en la comprensión y estudios de las ciencias básicas como las matemáticas, astronomía, etc.

Por otro lado, el desarrollo tecnológico está ofreciendo nuevas herramientas al investigador, que puede emplear tanto desde un punto de vista metodológico como para la difusión de sus resultados. Los recursos tecnológicos de apoyo a la investigación abren nuevos canales para que los científicos realicen su actividad y para la comunicación de su producción. La innovación aplicada a la investigación también se sirve de tecnologías participativas y recursos abiertos. Es la denominada e-Ciencia o Ciencia 2.0.

La ciencia 2.0 [47, 48] es la aplicación de las tecnologías de la web social al proceso científico. La web social, web 2.0 o web participativa se caracteriza por el empleo de tecnologías abiertas, tanto desde el punto de vista de la arquitectura de la información, como de la interconexión de servicios y, sobre todo, del trabajo colectivo que se realiza de forma telemática, colaborativa y desinteresada.

Esta metodología introdujo cambios significativos en los entornos del trabajo científico. La principal característica de la web social es la participación. Las tecnologías 2.0 permiten que las personas se relacionen de manera fluida y que los datos se compartan de forma abierta. Son varias las formas en las que la web social se aplica a la investigación, sobre todo en la gestión de la información bibliográfica y en la relación entre investigadores. Es posible determinar que existen tres grandes ámbitos en los que la ciencia abierta se manifiesta: compartir la investigación, compartir los recursos, y compartir los resultados. Esto anterior es lo que se ha denominado en los últimos años ciencia ciudadana [49–51].

En este artículo presentamos una estrategia colaborativa y abierta para que estudiantes de todas las edades en las etapas primeras de los ciclos escolares puedan calcular y entender la rotación diferencial del Sol y a través de una metodología sencilla puedan obtener resultados y discutirlos en sus clases y ambientes de trabajo. Para ello se ha diseñado una aplicación web que consiste en un entorno autocontenido y de trabajo colaborativo para, a partir de imágenes reales de los observatorios solares, en particular SOHO [33], los estudiantes con unos simples pasos e instrucciones puedan calcular la rotación diferencial del Sol con sus propias manos y compartir resultados en clase y promover además así actividades de ciencia en el contexto de la escuela.

Algunas iniciativas que se consideran análogas a la que proponemos existen en versiones abiertas y accesibles por cualquier persona en el mundo. Particularmente, la desarrollada por la Cooperación a través de la Educación en la Investigación Científica y Astronómica (o CESAR, por su acrónimo en inglés de *Cooperation through Education in Science and Astronomy Research*, <https://cesar.esa.int/>) de la iniciativa de educación y ciencia de la Agencia Espacial Europea (ESA) para el abordaje de estrategias de enseñanza y aprendizaje de la astronomía en niños en edad escolar.

Otra iniciativa, construida como una librería de PYTHON abierta consiste en la desarrollada por SUNPY (<https://sunpy.org/>), el cual es un entorno de análisis de datos solares desarrollado por la comunidad, gratuito y de código abierto. Su objetivo es proporcionar las funcionalidades

y herramientas básicas para analizar datos solares con PYTHON [52].

Nuestra aproximación intenta tener una aplicación limpia y muy documentada, agradable a la vista y fácil de usar sin complicaciones adicionales, autocontenida y con suficiente ayuda guiada para el desarrollo de la actividad. Adicionalmente, nuestra aplicación calcula automáticamente algunos parámetros para disminuir el sesgo asociado a la medición de parámetros, lo que contribuye a que los resultados obtenidos tengan menor incertidumbre asociada a la medida y el cálculo de la rotación diferencial del Sol. Finalmente, un objetivo importante se centra en la posibilidad de convertir las aulas de las escuelas en laboratorios de investigación y propiciar entornos y espacios colaborativos de aprendizaje que maximicen los objetivos de aprendizajes en las escuelas, en particular lo que tienen que ver con astronomía y ciencias del espacio.

El documento se divide en secciones como sigue. En la Sec. 2 se establece la metodología que hemos seguido y la descripción de los datos usados para la actividad planteada. En la Sec. 3 presentamos la estrategia y la aplicación web desarrollada con sus principales características e innovaciones. Algunos resultados de la aplicación y funcionamiento de la aplicación se presentan en la Sec. 4 y finalmente, las conclusiones y discusiones se exponen en la Sec. 5.

## 2. Metodología

### 2.1. Las imágenes

Para obtener las imágenes que son usadas en nuestra aplicación web, hay dos soluciones posibles. Si se hay disponibilidad del telescopio solar para la observación y la captura de imágenes, se pueden descargar las imágenes del archivo de las observaciones del día o el rango de tiempo deseado. Si el telescopio solar no está disponible o si no se quiere utilizar, la otra opción es descargar un conjunto de imágenes preseleccionadas del sitio web para esta actividad de ciencia ciudadana y utilizarlas.

Una tercera opción consiste en que la aplicación podrá usar imágenes de observación que hayan sido tomadas por los usuarios, para lo que se requerirá unas ciertas condiciones para asegurar el perfecto funcionamiento y aplicabilidad del desarrollo de las actividades. Esta versión se encuentra, sin embargo aún en periodo de producción pero estará disponible prontamente.

Obviamente, parte del propósito educativo es acercar los telescopios profesionales a los estudiantes para que puedan aprender cómo funcionan los observatorios profesionales. Además podrán ver cómo un telescopio funciona remotamente a distancia.

Todas las imágenes que obtenemos para el desarrollo de la aplicación provienen de la página web del SOHO (<https://soho.nascom.nasa.gov/data/data.html>) en la sección de principales archivos para datos preprocesados y software. Las imágenes se alo-

jan en un dominio ftp que contiene todos los archivos históricos hasta la fecha y pueden ser descargados libremente en: [https://soho.nascom.nasa.gov/data/synoptic/sunspots\\_earth/](https://soho.nascom.nasa.gov/data/synoptic/sunspots_earth/). Una parte de la aplicación contiene un algoritmo escrito en PYTHON que permite descargar las imágenes automáticamente cuando se le da la opción de buscar imágenes en un rango de fechas. En esta dirección existen dos tipos de imágenes, unas en formato de  $512 \times 512$  píxeles y otras en formato de  $1024 \times 1024$  píxeles. Nosotros usamos en esta aplicación las segundas con mayor resolución.

**2.2. El método**

Este caso de uso de ciencia ciudadana para abordar temas de ciencias, matemáticas y astronomía en el aula de clase y en contextos alternos de aprendizaje, está dividido en dos secciones. La primera sección trata de entender cómo gira el Sol, es decir, comprender que el Sol no es un cuerpo sólido y que se mueve más rápido cerca del ecuador solar y más lento a medida que nos acercamos a los polos. Esto es la rotación diferencial del Sol. La otra sección consiste en visualizar las diferentes estructuras de la fotosfera del Sol. Los alumnos tienen que identificar todas las estructuras que puedan y entender lo que son. Este es un caso de ciencia más fácil comparado con los otros casos de ciencia solar, por esta razón este se centra en la comprensión del Sol y no tiene muchos cálculos o mediciones.

Nosotros usamos un método para calcular la rotación diferencial del Sol. El método se describe en los siguientes pasos.

Comenzamos con dos imágenes para dos diferentes días consecutivos (o cercanamente consecutivos)  $t_1$  y  $t_2 = t_1 + \tau$  para algún intervalo de tiempo  $\tau$ , de tal manera que  $\tau$  es cercano a cuatro o cinco días a partir de  $t_1$ . Por ahora en realidad lo importante es que este tiempo  $\tau$  es tal que una mancha solar pueda verse completamente en todas las imágenes en este intervalo de tiempo para obtener resultados satisfactorios.

Lo que sigue es encontrar las coordenadas heliográficas de cada una de las manchas solares en el sistema de referencia del Sol en las imágenes. En este caso,  $x_{s1}, y_{s1}$  se refieren a las coordenadas locales en píxeles de la imagen en la que se ubica la mancha oscura en  $t_1$ ,  $x_{s2}$  y  $y_{s2}$  son las correspondientes coordenadas de la misma mancha oscura en un tiempo  $t_2$ , y  $2\alpha$  representa la dimensión de las imágenes, en el caso de imágenes usadas de  $1024 \times 1024$  píxeles entonces  $\alpha = 512$  píxeles. Las Figs. 2 y 3 muestran gráfica y geométricamente el mecanismo sencillo de cálculo de las coordenadas heliográficas de las manchas solares y también los parámetros necesarios para la aplicación de la metodología propuesta. Una primera tarea consiste en calcular las coordenadas locales en el formato de la imagen de cada mancha solar. Esta tarea puede hacerse usando editores de gráficos como INKSCAPE, ADOBE PHOTOSHOP, entre otros, que permitan extraer las coordenadas en píxeles de las manchas. La idea básica consiste en determinar la distancia  $D = D_1 + D_2$

(Fig. 3) que servirá para el cálculo de la velocidad de rotación del Sol (velocidad con la que la mancha se mueve en el disco solar).

La parte más importante de esta actividad es establecer la orientación Este-Oeste de la dirección heliográfica del Sol. En el caso de las imágenes que usamos del SOHO, luego de un proceso de ingeniería de imágenes y antes de ser colocadas en la web, estos discos solares ya están alineados en la

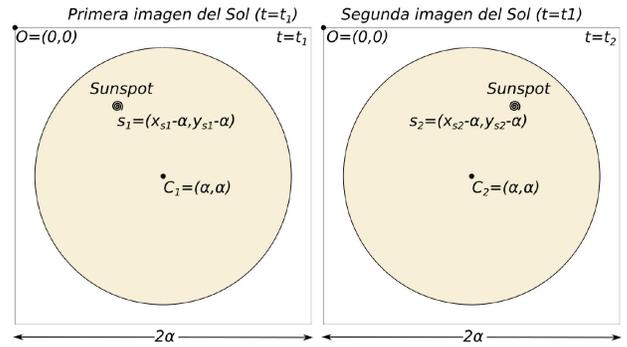


FIGURE 2. Modelo inicial de imágenes de manchas solares para la aplicación del método del cálculo de la rotación diferencial del Sol. (Imagen de creación propia).

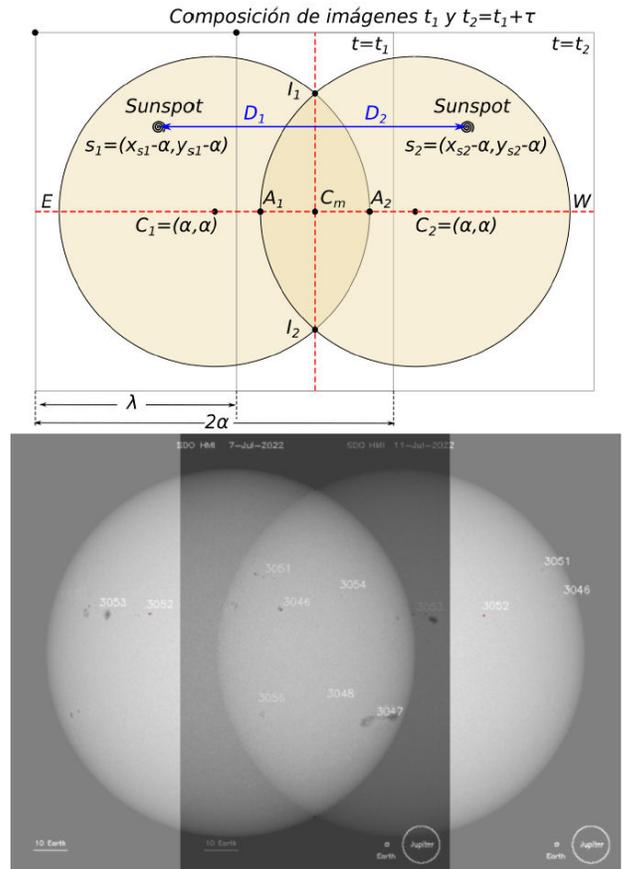


FIGURE 3. Solapamiento de dos imágenes consecutivas del Sol mostrando las manchas solares y la geometría básica usada para el cálculo de sus coordenadas heliográficas y rotación diferencial. (Imagen de creación propia).

dirección E-O. Sin embargo, si se quisiera hacer ciencia usando imágenes propias del Sol, este es un preprocesamiento previo que debe hacerse. En este caso basta con superponer un par de imágenes consecutivas en tiempo y dibujar la línea secante que une dos manchas solares, la misma, esto dará cuenta de la dirección E-O de manera sencilla, una vez hecho esto las imágenes pudieran girarse para hacer que dicha dirección sea una línea recta horizontal completamente como se muestra en la Fig. 3.

Así como la Tierra tiene un eje de rotación, el Sol también lo tiene. Es bien sabido que el eje de rotación de la Tierra está inclinado 23.5 grados mientras que el eje de rotación del Sol está inclinado 7 grados. Si los ejes de rotación de la Tierra y del Sol fueran paralelos entre sí y perpendiculares a la eclíptica, entonces la dirección E-O que mencionamos antes sería el ecuador del Sol. Para la determinación de las coordenadas heliográficas del Sol a partir de las imágenes en el rango visible del espectro electromagnético, así como también por ejemplo imágenes en  $h\text{-}\alpha$ , y posteriormente establecer las coordenadas heliográficas de las manchas solares en cada una de las imágenes, usamos algunos algoritmos que se desprenden del bien conocido libro de “*Astronomical Algorithms*” de Jean Meeus [53]. En estos algoritmos que hemos usado y que han sido organizados en la aplicación y también en el repositorio de Github (<https://github.com/sierraporta/SunspotCalc> y <https://github.com/TheSkyLabTeam/sunspotcalc>) que conserva el código original escrito en PYTHON para el desarrollo de esta aplicación, se toma en cuenta el día juliano de la toma de la imagen para establecer la posición del Sol y las coordenadas heliográficas del centro del disco solar.

Entonces teniendo esto en cuenta, el usuario en la aplicación carga las imágenes que se desean analizar, una a una el usuario debe, con un par de clicks de mouse, ubicar el punto de la superficie del disco solar y también el punto que corresponde a la mancha solar que se quiere analizar  $P(\text{Sunspot}_i) = (x_{s_i} - \alpha, y_{s_i} - \alpha)$ . Dado que las imágenes vienen centradas y se pueden bien medir en coordenadas locales dadas en píxeles, el centro del disco ( $\alpha$  en la Fig. 2) se establece como la mitad del tamaño de la imagen. Con la determinación de  $\alpha$  y las coordenadas en píxeles de la circunferencia del Sol, se halla el radio del mismo ( $R$ ) y también las coordenadas locales de cada mancha solar en la imagen. Entonces, con las coordenadas de la mancha solar en mente podemos calcular la distancia desde el centro del disco solar

$$R_m = \sqrt{x_{s_i}^2 + y_{s_i}^2}. \quad (1)$$

En la aplicación hemos reducido los clicks en la imagen a sólo uno para determinar la posición de la mancha solar. El radio del Sol (local en la imagen en píxeles) se calcula automáticamente a partir de un algoritmo de segmentación (incluido en el código PYTHON de la aplicación) que determina el borde preciso en el que existe transición de color entre el disco solar y el fondo negro de la imagen. Esto minimiza los errores de operación y medición.

Luego, el ángulo de posición de la mancha solar medido desde la dirección N-S (que llamamos  $P_m$ ) y el ángulo entre la mancha solar con la visual (que llamamos  $\rho$ ) pueden ser halladas directamente a partir de la aplicación sencilla:

$$P_m = \arctan\left(\frac{y_{s_i}}{x_{s_i}}\right), \quad \rho = \arcsin\left(\frac{R_m}{R}\right) - \frac{aR_m}{2R}, \quad (2)$$

donde  $a$  es el diámetro angular del Sol en grados decimales [53].

Como hemos dicho, el eje del Sol está inclinado por lo que vemos diferentes ángulos con la dirección N-S a lo largo de un año. Además el centro del sistema de coordenadas heliográfico no es el lugar donde las líneas E-O y N-S se cruzan entre sí. Por todo esto, necesitamos tomar algunos valores:  $P$  el ángulo de posición del eje de rotación solar medido desde la dirección N-S. Positivo cuando está hacia el Este y negativo cuando está al Oeste;  $B_0$  la latitud heliográfica del centro del disco solar; y  $L_0$  la longitud heliográfica del centro del disco solar. Para facilitar este cálculo usamos una rutina escrita en PYTHON (embebida en la aplicación web) que lo hace automáticamente a partir de los algoritmos astronómicos [53], pero también hay diversas páginas que permiten hacer este cálculo en línea, por ejemplo: <https://bass2000.obspm.fr/ephem.php>. La interpretación geométrica de estas cantidades puede verse en la Fig. 4.

Todos estos números son fijados exactamente con sólo la información de la fecha de la imagen que ha sido tomada.

En este punto, los usuarios obtendrán las coordenadas heliográficas de cualquiera de las manchas solares teniendo los valores:  $R_m, \rho, P_m, L_0$  y  $B_0$ , donde las dos últimas  $L_0$  y  $B_0$  son las coordenadas heliográficas del Sol en la imagen las

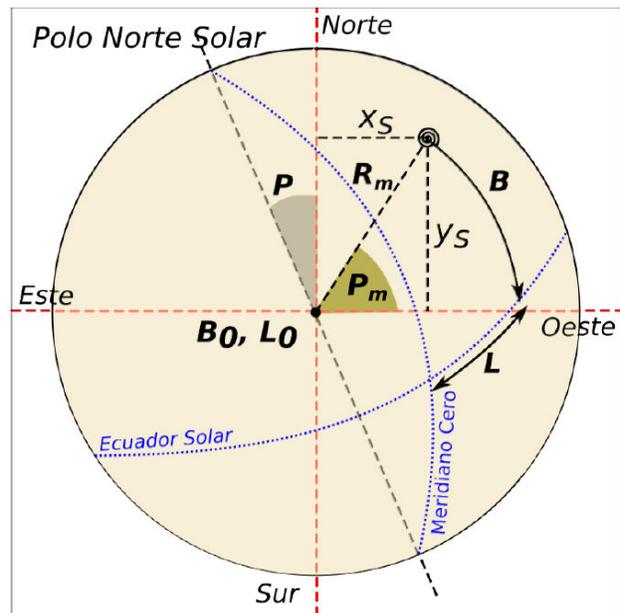


FIGURE 4. Definición geométrica de los parámetros involucrados en el cálculo de la rotación diferencial del Sol.

cuales se calculan a partir de efemérides para el día juliano en cuestión en el que se tomó la imagen. Luego, se usan las siguientes fórmulas para calcular las coordenadas heliográficas de cada mancha solar en el sistema de referencia del Sol. Para la latitud  $B$  tenemos:

$$B = \arcsin [\sin B_0 \cos \rho + \cos B_0 \sin \rho \cos(P - P_m)], \quad (3)$$

y también para la latitud  $L$ :

$$L = L_0 + \arcsin [\sin(P - P_m) \sin \rho \cos B]. \quad (4)$$

Nótese que todos los valores que se utilizan en la fórmula están expresados en grados al igual que los resultados.

El software de la página web que hemos construido es autocontenido en el sentido que todos estos valores anteriores son calculados automáticamente a partir de algunos clicks que hace el usuario en cada una de la imágenes. La idea es elegir entonces cerca de cuatro imágenes consecutivas en tiempo para elegir la manchas solares a analizar. La razón de elegir al menos 4 imágenes es por dos razones: primero, el cálculo de la rotación diferencial del Sol es mejor apreciable en diferentes latitudes, y segundo, es mejor tomar promedios de varios de estos valores para reducir el error asociado con la medición local de hacer clicks en las imágenes individuales, esto es debido a que la mancha puede ser pequeña comparada con las dimensiones de la imagen del disco solar, por lo que, pudiera haber un error asociado a la precisión de hacer click justo en el centro de la mancha oscura.

Después de que el usuario ha calculado las coordenadas heliográficas de cada mancha solar, entonces es posible calcular la velocidad angular del sol, haciendo uso de el cambio en la longitud y luego con una regla de tres sencilla, calcular la rotación sabiendo el intervalo de tiempos entre cada imagen. Es el ángulo en el que un objeto gira en un tiempo determinado el que determina la velocidad de rotación. Se trata de un ejercicio bastante sencillo y las matemáticas no son complejas.

Pasemos ahora a los cálculos. En primer lugar, los usuarios tienen que calcular el periodo de tiempo entre cada par de imágenes, es decir, el periodo de tiempo entre la primera y la segunda imagen, luego el tiempo entre la segunda y la tercera, y así sucesivamente. Pueden expresar ese tiempo en días o en segundos. Una vez hecho esto, tienen que calcular el número de grados longitudinales que se ha movido la mancha solar durante cada par de imágenes expresado en grados.

Ahora tienen que calcular la media de las diferencias de longitud y la media de la diferencia horaria y simplemente utilizar la fórmula:

$$\text{Velocidad angular} = \frac{\text{Diferencia de longitud}}{\text{Intervalo de tiempo}} = \frac{\Delta B}{\Delta T}, \quad (5)$$

luego para calcular la rotación es tan simple como expresar una regla de tres simple con la idea de que si la mancha da una vuelta completa ( $360^\circ$ ) en  $T_{\text{rot}}$  días, entonces en  $\Delta T$  días también hará diferencialmente  $\Delta B$  grados, o bien,

$$T_{\text{rot}} = \frac{\Delta T}{\Delta B} \times 360^\circ. \quad (6)$$

### 3. La aplicación web

SUNSPOTCALC se creó utilizando REACTJS y librerías como REACT ROUTER DOM para crear una aplicación web SPA (*Single Page Application*).

REACTJS es una biblioteca popular JAVASCRIPT de código abierto que se utiliza para crear interfaces de usuario (UI). Es una aplicación desarrollada y mantenida por Facebook, y una comunidad de desarrolladores individuales y empresas. Permite a los desarrolladores crear componentes de interfaz de usuario que pueden reutilizarse en una aplicación, lo que facilita la creación de interfaces complejas. Utiliza una sintaxis declarativa, lo que significa que los desarrolladores pueden describir cómo quieren que sea su interfaz de usuario y REACT se encargará de actualizarla cuando sea necesario. REACT también utiliza un DOM virtual (*Document Object Model*), que ayuda a mejorar el rendimiento de la aplicación reduciendo el número de cambios que hay que hacer en el DOM real.

REACT puede utilizarse para crear aplicaciones de una sola página (SPA), aplicaciones móviles e incluso aplicaciones de escritorio. Se ha convertido en una opción popular para los desarrolladores web debido a su facilidad de uso, rendimiento y la gran comunidad de desarrolladores y recursos disponibles.

Por otra parte, REACT ROUTER DOM es una biblioteca que se utiliza con REACT para habilitar la funcionalidad de navegación y enrutamiento en aplicaciones web. Permite a los desarrolladores definir rutas en su aplicación y manejar la navegación entre ellas.

Con REACT ROUTER DOM, los desarrolladores pueden crear enrutamiento del lado del cliente para su aplicación web, lo que significa que el enrutamiento se gestiona en el lado del cliente en lugar de en el lado del servidor. Esto se traduce en tiempos de carga de página más rápidos y una experiencia de usuario más fluida.

Dado que la aplicación destinada a todo público, pero principalmente a jóvenes, en cuestiones de diseño teníamos objetivos muy específicos. Tanto los colores, tipografías y formas que cuenta la interfaz de SUNSPOTCALC, están diseñados para que todo público, especialmente personas jóvenes, encuentren la interfaz de la aplicación atractiva.

Otro de los objetivos que se tuvieron en cuenta de acuerdo al diseño y la distribución de los elementos en la interfaz, fue simplificar al máximo el trabajo que debía hacer el usuario para llegar a los resultados deseados. Esto permitió implementar funcionalidades que facilitarían, por ejemplo, la búsqueda de las imágenes analizadas, en este caso indicando solamente la fecha de la misma.

El desafío principal para este proyecto fue adaptar el código que estaba establecido en el script de PYTHON a JAVASCRIPT de la forma más eficiente asegurando que el rendimiento fuera el máximo posible.

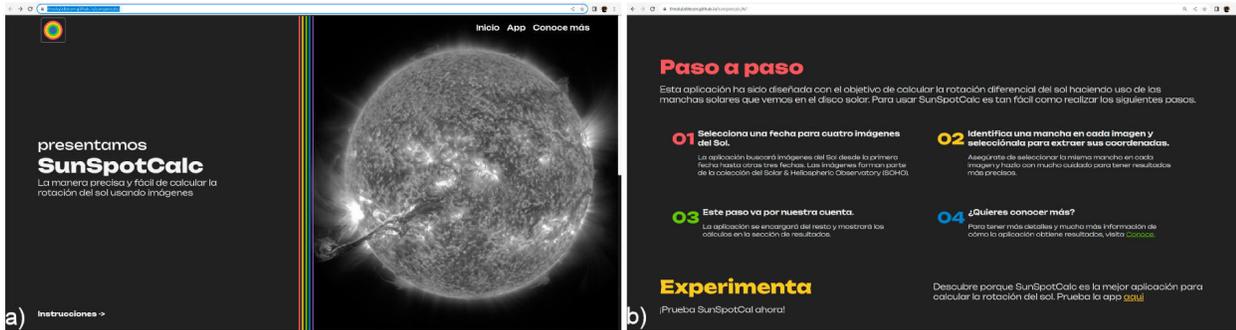


FIGURE 5. a) Página de entrada y bienvenida de la aplicación web SUNSPOTCALC<sup>ii</sup>. b) Página con instrucciones y metodología para usar la aplicación web.

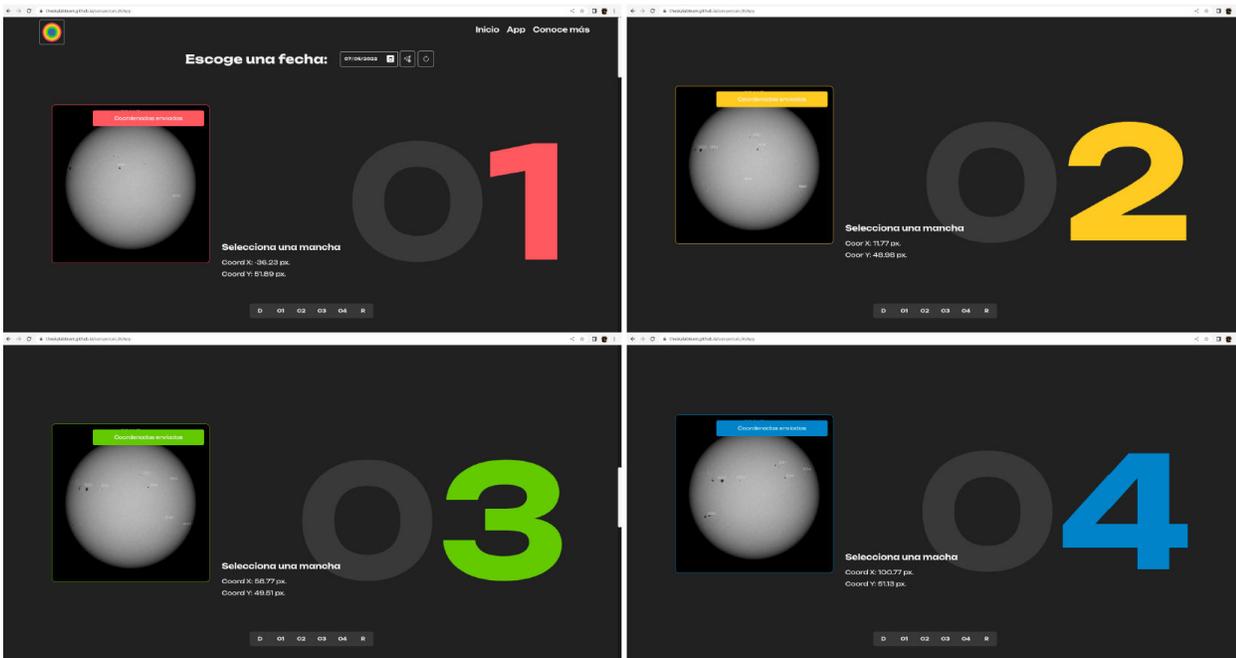


FIGURE 6. Todas las imágenes seleccionadas desde la especificación de la fecha para el funcionamiento de la aplicación web<sup>iii</sup>.

Entre las ventajas de REACTJS que se evaluaron para la creación del sitio web se destacan las siguientes: (1) es intuitivo: proporciona interactividad al diseño de cualquier interfaz de usuario. Además, permite un desarrollo de aplicaciones rápido y de calidad garantizada que, a su vez, ahorra tiempo tanto a clientes como a desarrolladores, (2) es declarativo: lo que significa que permite cambios significativos en los datos que resultan en alteraciones automáticas en las partes seleccionadas de las interfaces de usuario, gracias a esta funcionalidad progresiva, no es necesario realizar ninguna función adicional para actualizar la interfaz de usuario, (3) proporciona componentes reutilizables que los desarrolladores tienen la autoridad para reutilizar y crear una nueva aplicación, da a los desarrolladores la autoridad para reutilizar los componentes construir para alguna otra aplicación que tiene la misma funcionalidad, de este modo, se reduce el esfuerzo de desarrollo y se garantiza un rendimiento impecable, y (4) siempre se utiliza una fuerte mezcla de sintaxis JAVASCRIPT

y HTML, lo que simplifica automáticamente todo el proceso de escritura de código para el proyecto previsto.

El diseño de la plataforma fue pensado especialmente para consistir en una interfaz sencilla, agradable a la vista y sin complicaciones para el uso en ambientes educativos de aprendizaje para niños y adolescentes, por lo que fue pensada tratando de minimizar al mayor posible las dificultades de entendimiento y para asegurar una efectividad máxima en el desarrollo de actividades de aprendizaje.

La Fig. 5 muestra la presentación gráfica de la página web SUNSPOTCALC, la cual puede ser vista, probada, manipulada en la dirección web <https://theskylabteam.github.io/sunspotcalc>.

Una vez estando en la aplicación web, el estudiante va a la sección de la aplicación y elige una fecha específica para cargar un conjunto de cuatro imágenes consecutivas del Sol. Estas estarán cargadas automáticamente y debidamente discriminadas por días. La tarea siguiente consiste en hacer un

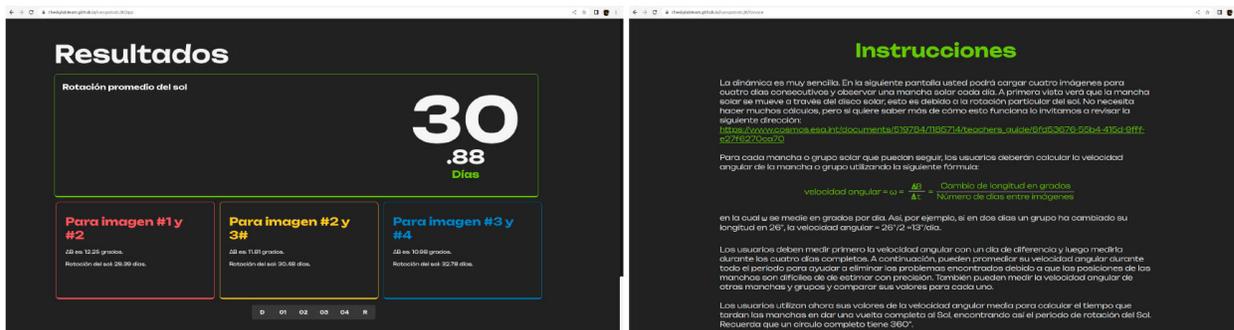


FIGURE 7. a) Screenshot de la sección de resultados de la aplicación web<sup>17</sup>. b) Screenshot de la sección de instrucciones y más información de la aplicación web.

click en cada una de las manchas solares en cada uno de los días consecutivos. Se entiende que la mancha seleccionada en cada una de las imágenes debe ser la misma para todos los días (ver Fig. 6). Una vez que se hace click en la mancha solar seleccionada la aplicación denotará con una marca la confirmación de que dicha mancha ha sido ya seleccionada y se han calculado las coordenadas locales de la mancha.

Automáticamente luego del proceso anterior, una sección de resultados es completada para mostrar la conclusión del proceso y los valores calculados en la experiencia (ver Fig. 7). En esta sección se resume la información para la rotación del Sol entre cada par de imágenes en días consecutivos y también la medida promedio de todas las imágenes. Para lograr mejores resultados se recomienda, sin embargo, que varios estudiantes usen la misma metodología para la misma fecha seleccionada y tomar promedios además de todas las experiencias no solo la propia.

#### 4. Algunos resultados

Para probar el rendimiento de la aplicación se ha hecho un ejercicio de ciencia ciudadana en el que un grupo de 15 estudiantes de 15-18 años ha probado la aplicación con instrucciones acerca de su uso. El caso de prueba formó parte de las organizaciones de actividades del semillero de astronomía y ciencia de datos de la Universidad Tecnológica de Bolívar (Cartagena de Indias, Colombia). Los estudiantes pertenecen a los programas de ingeniería y ciencias de la Universidad en sus primeros semestres de estudio. La actividad contempla varias secciones en el día en el cual se dispone de telescopios para hacer observación solar, equipados con correspondientes filtros de sol, además de diversas charlas de formación y divulgación.

Para tales efectos, los estudiantes escogieron un conjunto de imágenes descargadas de la aplicación y en el repositorio

TABLA I. Resultados de la aplicación del cálculo de la rotación diferencial del Sol en un conjunto de 15 estudiantes. En la tabla se muestra la siguiente información:  $N$  etiqueta cada estudiante haciendo la actividad, **Día inicio** y **Día final** representan los días de la primera imagen y última imagen en la seguidilla de 4 imágenes consecutivas evaluadas,  $T_{promedio}$  el periodo de rotación de la mancha oscura calculado con la aplicación y su correspondiente error  $\sigma_T = \sqrt{\sum_i (T_i - T_{promedio})^2 / N}$ , y  $\Delta B_{promedio}$  y  $\sigma_{\Delta B}$  promedios de las diferencias de latitudes heliográficas y su correspondiente desviación estándar.

$N$	Mancha oscura	Día inicio	Día final	$T_{prom}$	$\sigma_T$	$\Delta B_{prom}$	$\sigma_{\Delta B}$
0	2960	20220305	20220308	33.62	1.54	10.72	0.50
1	2965	20220310	20220313	30.15	1.74	11.97	0.67
2	2993	20220418	20220421	31.33	1.37	11.50	0.49
3	2994	20220418	20220421	31.59	0.48	11.40	0.17
4	3010	20220514	20220517	32.81	1.56	10.99	0.51
5	3014	20220516	20220519	29.14	1.66	12.38	0.72
6	3015	20220516	20220519	29.53	0.64	12.19	0.27
7	3053	20220707	20220710	27.94	1.10	12.90	0.52
8	3055	20220709	20220712	27.99	0.72	12.87	0.34
9	3062	20220721	20220724	33.03	1.20	10.91	0.40
10	3078	20220811	20220814	31.45	0.48	11.45	0.17
11	3082	20220817	20220820	33.50	2.99	10.80	0.92

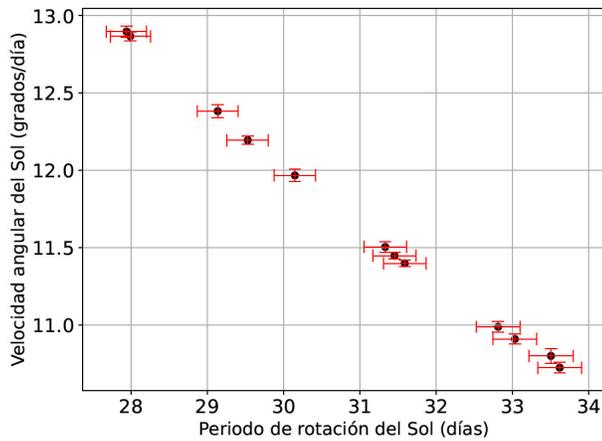


FIGURE 8. Relación entre la velocidad angular para el conjunto de manchas solares estudiado y el tiempo de rotación del Sol para diferentes latitudes.

de la misma para las diversas manchas solares en el año 2022. La información de las manchas elegidas se enumeran en la Tabla I y también los resultados de la aplicación. Adicionalmente, la Tabla I muestra los resultados del promedio del periodo de rotación para la mancha oscura elegida  $T_{\text{promedio}}$  y su correspondiente desviación estándar  $\sigma_T$ , así como también la diferencia de longitud en el movimiento promedio  $\Delta B_{\text{promedio}}/\text{día}$  y su correspondiente desviación estándar  $\sigma_{\Delta B}$ .

Como puede verse en la Tabla I, 15 estudiantes que hicieron parte de la actividad tomó cada uno una mancha solar entre un periodo de cuatro días consecutivos, y con el uso de la herramienta se obtuvieron los resultados que se muestran.

Como podemos observar, la velocidad angular del Sol depende de la latitud, ya que para diferentes manchas solares localizadas a diferentes latitudes, ésta tarda más o menos días en completar una vuelta completa. Como ahora tenemos la posición de las manchas solares para todos los días los alumnos pueden calcular esa velocidad angular diferente.

Después de que el alumno tenga escrito el cambio de ángulo para cada día y cada mancha solar, puede calcular la velocidad angular del Sol. Primero hay que explicar qué es la velocidad angular.

Una primera aproximación de la velocidad angular se define como la rapidez con la que un objeto gira alrededor de un eje o con la que cambia el desplazamiento angular entre dos cuerpos. Dicho desplazamiento se infiere del cambio angular en la longitud a medida que la mancha se mueve por el disco solar. Este desplazamiento, entonces, está representado por el ángulo  $\Delta B$ . Se trata de un ejercicio bastante sencillo y las matemáticas no son complejas.

Los alumnos tienen que calcular el periodo de tiempo entre cada par de imágenes, es decir, el periodo de tiempo entre la primera y la segunda imagen, luego el tiempo entre la segunda y la tercera, y así sucesivamente. Pueden expresar ese tiempo en días o en segundos. Una vez hecho esto, tienen que

calcular el número de grados longitudinales que se ha movido la mancha solar durante cada par de imágenes expresado en grados. Para facilitararlo, podrían crear otra tabla con sólo los valores necesarios y los intervalos. He aquí un ejemplo de esa tabla que hay que rellenar para cada mancha solar (ver Tabla I).

## 5. Conclusión

En el presente trabajo mostramos e introducimos una aplicación web basada en PYTHON para el desarrollo de actividades en torno al cálculo colaborativo, abierto y educativo, de la rotación diferencial del Sol. La aplicación web es un programa que se almacena en un servidor remoto y se entrega a los usuarios a través de Internet. Dado lo anterior, muchos grupos de estudiantes separados geográficamente, pueden hacer los mismos ejercicios, analizar imágenes de las manchas solares y por tanto establecer actividades de divulgación, y colaboración, dado que cada grupo experimenta su propio conocimiento, pueden compartir resultados y experiencias en torno a la aplicación y la dinámica solar. En fin últimas, la aplicación se concibe como una actividad complementaria que puede ser usada en combinación con otras para reafianzar y reforzar conocimientos y experiencias.

Hay muchas razones para desarrollar aplicaciones web, y pueden ser utilizadas por cualquier persona, desde empresas a particulares. El objetivo principal de la que acabamos de presentar consiste en un espacio virtual y autocontenido para fortalecer las actividades científicas ciudadanas acerca de la dinámica solar y posibilitar espacios de reflexión y práctica experimental educativa en entornos formales y no formales de la escuela básica. Por otro lado, la aplicación web creada, permite abordar la experimentación en clase de una manera abierta pero también innovadora en la que los estudiantes son protagonistas del desarrollo de habilidades y competencias en torno a la ciencia. Además, los estudiantes, pueden entender el valor de la ciencia, accediendo a datos reales de misiones y laboratorios internacionales, para poder ser analizados con poco procesamiento y sin necesidad de complicar con cálculos y matemáticas avanzadas.

## Agradecimientos

Los investigadores quisieran agradecer a la División de Investigación de la Universidad Tecnológica de Bolívar por la ayuda y el soporte que han otorgado en el marco del proyecto de investigación INV03CI2205 para la realización de esta investigación. Así mismo agradecemos a la Universidad por los equipos computacionales que han sido otorgados para el desarrollo exitoso de la actividad investigativa. Finalmente agradecemos a SOHO por la disposición de los datos usados en esta investigación y a su permanente disposición de datos libres y disponibles para el fomento de la ciencia abierta.

- i. Créditos: <https://i0.wp.com/www.thesuntoday.org/wp-content/uploads/2014/10/Spot-AR12192-largestofSC24a.003.jpg?ssl=1>.
- ii. SUNSPOTCALC: <https://theskylabteam.github.io/sunspotcalc>.
- iii. <https://theskylabteam.github.io/sunspotcalc>.
- iv. <https://theskylabteam.github.io/sunspotcalc>.
1. T. Wiegmann, J. K. Thalmann, and S. K. Solanki, The magnetic field in the solar atmosphere, *The Astronomy and Astrophysics Review* **22** (2014) 1, <https://doi.org/10.1007/s00159-014-0078-7>.
2. M. Georgoulis *et al.*, Solar magnetic helicity injected into the heliosphere: magnitude, balance, and periodicities over solar cycle 23, *The Astrophysical Journal* **705** (2009) L48, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/705/1/L48>.
3. P. Démoulin and E. Pariat, Modelling and observations of photospheric magnetic helicity, *Advances in Space Research* **43** (2009) 1013, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.12.004>.
4. H. Moradi *et al.*, Modeling the subsurface structure of sunspots, *Solar Physics* **267** (2010) 1, <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9630-4>.
5. J. H. Thomas and N. O. Weiss, *The theory of sunspots, Sunspots: Theory and Observations* (1992) 3, <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2769-1.1>.
6. G. E. Hale, Solar vortices (contributions from the Mt. Wilson Solar Observatory, no. 26), *Astrophysical Journal*, **28** (1908) 100
7. G. E. Hale, Preliminary results of an attempt to detect the general magnetic field of the Sun, *The Astrophysical Journal* **38** (1913) 27
8. R. F. Stein, Solar surface magneto-convection, *Living Reviews in Solar Physics* **9** (2012) 1, <https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-4>.
9. A. Vögler *et al.*, Simulations of magneto-convection in the solar photosphere—Equations, methods, and results of the MURaM code, *Astronomy & Astrophysics* **429** (2005) 335, <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041507>.
10. S. K. Solanki, Sunspots: An overview., *Astronomy & Astrophysics Review* **11** (2003) 4, <https://doi.org/10.1007/s00159-003-0018-4>.
11. M. Stix, The Sun's differential rotation, *In Reviews in Modern Astronomy 2* (Springer, 1989) pp. 248-266, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75183-7.23>.
12. R. Arlt and J. M. Vaquero, Historical sunspot records, *Living Reviews in Solar Physics* **17** (2020) 1, <https://doi.org/10.1007/s41116-020-0023-y>.
13. K. L. Harvey, The cyclic behavior of solar activity, *In The solar cycle*, **27** (1992) 335.
14. D. Sierra-Porta, Cross correlation and time-lag between cosmic ray intensity and solar activity during solar cycles 21, 22 and 23, *Astrophysics and Space Science* **363** (2018) 1, <https://doi.org/10.1007/s10509-018-3360-8>.
15. D. Sierra-Porta, On the fractal properties of cosmic rays and Sun dynamics cross-correlations, *Astrophysics and Space Science* **367** (2022) 1, <https://doi.org/10.1007/s10509-022-04151-5>.
16. D. Sierra-Porta, M. Tarazona-Alvarado, and J. Villalba-Acedo, Quantitatively relating cosmic rays intensities from solar activity parameters based on structural equation modeling, *Advances in Space Research* (2023), <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.02.044>.
17. I. Sammis, F. Tang, and H. Zirin, The dependence of large flare occurrence on the magnetic structure of sunspots, *The Astrophysical Journal* **540** (2000) 583, <https://doi.org/10.1086/309303>.
18. J. M. Borrero and K. Ichimoto, Magnetic structure of sunspots, *Living Reviews in Solar Physics* **8** (2011) 1, <https://doi.org/10.12942/lrsp-2011-4>.
19. S. Tomczyk and E. Landi, Upgraded coronal multi-channel polarimeter (UCoMP), *Solar Heliospheric and Interplanetary Environment* (SHINE 2019) (2019) 131
20. S. Tomczyk *et al.*, First Images from the Upgraded Coronal Multi-channel Polarimeter (UCoMP), *In AGU Fall Meeting Abstracts*, **2021** (2021) 2089.
21. M. P. Rast *et al.*, Critical science plan for the Daniel K. Inouye solar telescope (DKIST), *Solar Physics* **296** (2021) 1, <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01789-2>.
22. F. Wöger *et al.*, The Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST)/Visible Broadband Imager (VBI), *Solar Physics* **296** (2021) 1, <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01881-7>.
23. C. Rao, *et al.*, 1.8-m solar telescope in China: Chinese large solar telescope, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **1** (2015) 024001, <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.1.2.024001>.
24. R. Volkmer, *et al.*, GREGOR: the new 1.5-m solar telescope on Tenerife, *In Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*, **4853** (2003) 60, <https://doi.org/10.1117/12.471367>.
25. O. Von Der Lüh, *et al.*, GREGOR: a 1.5 m telescope for solar research, *Astronomische Nachrichten: Astronomical Notes* **4853** (2001) 353, [https://doi.org/10.1002/1521-3994\(200112\)322:5/6%3C353::AID-ASNA353%3E3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1521-3994(200112)322:5/6%3C353::AID-ASNA353%3E3.0.CO;2-Z).
26. Y. Yan *et al.*, The Chinese spectral radioheliograph-CSRH, *Earth, Moon, and Planets* **104** (2009) 97, <https://doi.org/10.1007/s11038-008-9254-y>.
27. W. Wang *et al.*, Calibration and data processing for a Chinese Spectral Radioheliograph in the decimeterwave range, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **65** (2013), <https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S18>.
28. A. Valio *et al.*, Polarization Emission of Millimeter Activity at the Sun (POEMAS): new circular polarization solar telescopes at two millimeter wavelength ranges, *Solar Physics* **283** (2013) 651, <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0237-4>.

29. T. J. Schmit *et al.*, Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)-14 super rapid scan operations to prepare for GOES-R, *Journal of Applied Remote Sensing* **7** (2013) 073462, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.7.073462>.
30. B. K. Dichter *et al.*, Specification, design, and calibration of the space weather suite of instruments on the NOAA GOES-R program spacecraft, *IEEE Transactions on Nuclear Science* **62** (2015) 2776, <https://doi.org/10.1109/TNS.20152477997>.
31. K. Paularena and J. King, NASA's IMP 8 spacecraft, In *Interball in the ISTP Program*, pp. 145-154, (Springer, 1999), <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4487-2.11>.
32. V. Domingo, B. Fleck, and A. Poland, The scientific payload of the space-based Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), *Space Science Reviews* **70** (1994) 7, <https://doi.org/10.1007/BF00777835>.
33. V. Domingo, B. Fleck, and A. Poland, SOHO: the solar and heliospheric observatory, *Space Science Reviews* **72** (1995) 81, <https://doi.org/10.1007/BF00768758>.
34. D. Müller *et al.*, The solar orbiter mission-science overview, *Astronomy & Astrophysics* **642** (2020) A1, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038467>.
35. A. W. Case *et al.*, The solar probe cup on the Parker Solar Probe, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **246** (2020) 43, <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab5a7b>.
36. J. Halekas, *et al.*, Electrons in the young solar wind: First results from the parker solar probe, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **246** (2020) 22, <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab4cec>.
37. T. J. Immel, *et al.*, The ionospheric connection explorer mission: Mission goals and design, *Space Science Reviews* **214** (2018) 1, <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0449-2>.
38. R. Howard, P. Gilman, and P. Gilman, Rotation of the sun measured from Mount Wilson white-light images, *The Astrophysical Journal* **283** (1984) 373.
39. E. Schröter, The solar differential rotation: present status of observations, *Solar Physics* **100** (1985) 141.
40. J. G. Beck, A comparison of differential rotation measurements-(Invited Review), *Solar physics* **191** (2000) 47, <https://doi.org/10.1023/A:1005226402796>.
41. P. Scherrer, J. Wilcox, and L. Svalgaard, Rotation of the sun: observations at Stanford, *Astrophys. J.*; (United States) **241** (1980)
42. R. Howard, J. E. Boyden, and B. J. Labonte, Solar rotation measurements at Mount Wilson: I. Analysis and instrumental effects, *Solar Physics* **66** (1980) 167.
43. R. K. Ulrich *et al.*, Solar rotation measurements at Mount-Wilson: V. Reanalysis of 21 years of data, *Solar Physics* **117** (1988) 291.
44. J. Beck, T. Duvall Jr, and P. Scherrer, Long-lived giant cells detected at the surface of the Sun, *Nature* **394** (1998) 653.
45. R. Ulrich, Identification of very large scale velocity structures on the solar surface using Mt Wilson synoptic observations, *In Structure and Dynamics of the Interior of the Sun and Sun-like Stars*, **418** (1998) 851.
46. D. A. Lamb, Measurements of solar differential rotation and meridional circulation from tracking of photospheric magnetic features, *The Astrophysical Journal* **836** (2017) 10, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/10>.
47. B. Shneiderman, Science 2.0, *Science* **319** (2008) 1349
48. T. Bücheler and J. H. Sieg, Understanding science 2.0: Crowdsourcing and open innovation in the scientific method, *Procedia Computer Science* **7** (2011) 327, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.09.014>.
49. R. Bonney *et al.*, Can citizen science enhance public understanding of science?, *Public understanding of science* **25** (2016) 2, <https://doi.org/10.1177/0963662515607406>.
50. J. P. Cohn, Citizen science: Can volunteers do real research?, *BioScience* **58** (2008) 192, <https://doi.org/10.1641/B580303>.
51. P. J. Marshall, C. J. Lintott, and L. N. Fletcher, Ideas for citizen science in astronomy, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **53** (2015) 247.
52. The SunPy Community *et al.*, The SunPy Project: Open Source Development and Status of the Version 1.0 Core Package, *The Astrophysical Journal* **890** (2020) 68, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4f7a>.
53. J. Meeus, *Astronomical algorithms*, Richmond, VA:Willmann-Bell (1998).
54. C. Rao *et al.*, First light of the 1.8-m solar telescope-CLST (2020), <https://doi.org/10.1007/s11433-019-1557-3>.