

# Estudio de la actividad solar mediante el análisis de las manchas solares

Arlet Pi Jaumà

IES Jaume Vicens Vives, curso 2015-2016

Grupo: 2n de Bachillerato A

Tutoría: Laura Vallejo Domingo

## Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda de diversas personas que me han orientado, apoyado y acompañado desde el primer momento para que pudiera realizarlo con una gran satisfacción y disfrutarlo.

En primer lugar agradezco a la Agrupación Astronómica de Girona todo el interés mostrado y la ayuda que me han proporcionado dejándome utilizar su telescopio. Especialmente quiero agradecer a Rafael Balaguer Rosa, presidente de esta agrupación, el tiempo y entusiasmo dedicados para que yo pudiera disfrutar haciendo mi trabajo. Gracias por prestarme bibliografía, enseñarme a utilizar un telescopio, orientarme y resolver mis dudas cuando estaba perdida.

Agradecer enormemente el apoyo de mi familia en todo momento, ya que sin ella este trabajo no habría sido posible. Aparte de acompañarme al centro astronómico siempre que hacía falta, me han ayudado y creído en mi desde el principio hasta el final.

Finalmente quiero agradecer el tiempo que mi tutora, Laura Vallejo Domingo, ha dedicado al trabajo, haciendo correcciones siempre que era necesario. También a Lluïsa González Vall-llovera, por haberme asesorado en las dudas que me surgían. Durante la realización del trabajo he aprendido a trabajar de manera más independiente y seguir la línea que yo misma me marcaba, lo que me ha proporcionado una gran riqueza personal.

# Índice de contenidos

<b>1. <u>Introducción</u></b> .....	<b>4</b>
<b>2. <u>Metodología</u></b> .....	<b>6</b>
<b>3. <u>Fundamentos teóricos</u></b> .....	<b>7</b>
3.1. <u>El Sol, nuestra estrella</u> .....	7
3.1.1. <u>Características generales</u> .....	7
3.1.2. <u>Como se genera la energía</u> .....	8
3.2. <u>Actividad solar</u> .....	9
3.2.1. <u>Campo magnético</u> .....	9
3.2.2. <u>Manchas solares</u> .....	11
3.2.3. <u>Protuberancias</u> .....	13
3.2.4. <u>Fulguraciones</u> .....	13
3.2.5. <u>Viento solar</u> .....	13
<b>4. <u>Captura y tratamiento de las imágenes</u></b> .....	<b>15</b>
4.1. <u>Captura</u> .....	15
4.2. <u>Tratamiento</u> .....	16
<b>5. <u>Cálculo de la actividad solar. Número de Wolf</u></b> .....	<b>18</b>
5.1. <u>Número de Wolf</u> .....	18
5.2. <u>Cálculo del número de Wolf</u> .....	19
5.3. <u>Comparación con los resultados de Space Weather</u> .....	22
<b>6. <u>Posición de las manchas solares</u></b> .....	<b>26</b>
<b>7. <u>Cálculo de la rotación solar</u></b> .....	<b>30</b>
<b>8. <u>Cálculo del tamaño de las manchas solares</u></b> .....	<b>35</b>
<b>9. <u>Conclusiones</u></b> .....	<b>38</b>
<b>10. <u>Bibliografía</u></b> .....	<b>41</b>
10.1. <u>Páginas web</u> .....	41
10.2. <u>Libros</u> .....	42
10.3. <u>Descargas en PDF</u> .....	43
<b>11. <u>Apéndices</u></b> .....	<b>44</b>
11.1. <u>Apéndice 1. Tipos de estrellas</u> .....	44
11.2. <u>Apéndice 2. Ciclo de vida del Sol</u> .....	45
11.3. <u>Apéndice 3. Estructura del Sol</u> .....	47
11.4. <u>Apéndice 4. Fusión nuclear</u> .....	49
11.5. <u>Apéndice 5. El telescopio Coronado PST Ca-K</u> .....	49
11.6. <u>Apéndice 6. Clasificaciones de los grupos de manchas</u> .....	51
11.7. <u>Apéndice 7. Cálculo del número de Wolf</u> .....	52
11.8. <u>Apéndice 8. Cálculo del período sideral de rotación del Sol</u> .....	53

## 1. Introducción

¿Quién no se ha fascinado alguna vez mirando el color rojizo del cielo durante una puesta de Sol, o viendo la bola de fuego que éste forma al desaparecer en el horizonte y reaparecer al día siguiente con una precisión matemática asombrosa? ¿A quién no le apetece notar el calor del Sol en la piel un día frío de otoño, o quién no se ha emocionado contemplando la inmensidad el cielo estrellado en una noche de luna nueva, y preguntarse donde están estas estrellas tan lejanas o si todavía existen? Estos fenómenos que envuelven con naturalidad nuestras vidas son bastante desconocidos para nosotros.

Desde pequeña he sentido curiosidad para observar el entorno en el que vivimos, y con este trabajo pretendo estudiar la estrella principal de nuestro firmamento. El Sol, al ser la estrella más cercana a la Tierra, nos permite estudiar el funcionamiento y estructura de las mismas, así como los efectos que producen en planetas cercanos. Como todas las estrellas, está en constante actividad y evolución. Desde la Tierra, los cambios de actividad solar pasan bastante desapercibidos, pero son muy importantes. Por ello, intentaré hacer un estudio de la actividad solar a partir de la observación de las manchas que aparecen en su superficie (manchas solares) y también estudiaré las principales características de estas manchas: su posición, evolución y tamaño.

La Agrupación Astronómica de Girona (AAG)<sup>1</sup> me proporcionará todos los datos e instrumentos que necesite (vídeos del Sol, telescopio...), y me orientarán a la hora de capturar las imágenes y tratarlas.

Los **objetivos** de mi trabajo son:

- 1) Conocer el funcionamiento y características de una estrella y, fundamentalmente, de la más cercana a nosotros, el Sol
- 2) Aprender cómo funciona un telescopio y el proceso de captura y tratamiento de imágenes. Esto implica capturar vídeos del Sol, trasladarlos al ordenador y procesarlos con los programas adecuados para transformarlos en imágenes de alta resolución
- 3) Calcular el número de Wolf (índice de la actividad solar) durante el año 2014 y parte del 2015, representarlo en un gráfico, ver su evolución y compararlo con los cálculos hechos por asociaciones astronómicas internacionales
- 4) Estudiar los cambios de posición (latitud y longitud) de las manchas solares y hacer

---

<sup>1</sup>AstroGirona, <http://www.astrogirona.com/>

un gráfico que las represente para detectar las zonas del Sol más activas. A partir de la evolución de la posición de una mancha intentaré calcular el período de rotación del Sol

- 5) Calcular el tamaño de algunas manchas solares de diferentes tamaños para percatarnos de sus enormes dimensiones

## 2. Metodología

La metodología utilizada para conseguir los objetivos citados es la siguiente:

- Etapa 1: Estudio preliminar teórico, centrado en el Sol y las características de las estrellas, utilizando para ello diferentes fuentes bibliográficas (libros, artículos, páginas web,...). Este estudio teórico es imprescindible para entender el funcionamiento, estructura y composición del Sol y sobretodo aspectos de la actividad solar, así como características propias de las estrellas (clasificación, ciclo de vida...). Con ello podré comprender los siguientes pasos y el porqué de ellos.
- Etapa 2: La AAG me prestará su material del observatorio Can Roig (en Llagostera) para realizar las observaciones del Sol y me enseñarán como hacerlo. Aprender a utilizar un telescopio, capturar las imágenes y pasarlas al ordenador será una parte importante del trabajo. Con una cámara adaptada al telescopio y conectada directamente al ordenador, capturaré directamente los vídeos, que convertiré después en imágenes estáticas (de mejor calidad que si si fueran capturadas directamente).
- Etapa 3: Una vez tenga las imágenes tratadas y orientadas adecuadamente, calcularé el número de Wolf de cada una y representaré los resultados en un gráfico para ver su variación. Se trata de un cálculo bastante impreciso, puesto que depende de la calidad de la imagen, y de las manchas y los grupos que forman y que ve el observador, no obstante es el índice que mejor refleja la actividad solar y su evolución. Dado que no se si podré obtener algún resultado fiable, compararé mis resultados con los oficiales de la NASA y otras asociaciones internacionales.
- Etapa 4: Para el estudio de la posición de las manchas solares utilizaré unas plantillas que corrigen la inclinación del Sol respecto la Tierra (diferente cada día del año) y las aplicaré a las imágenes capturadas. Ello me permitirá registrar la longitud y la latitud de todas las manchas solares y así poder configurar un gráfico con su posición. Estudiando el movimiento de una misma mancha a lo largo de unos días y utilizando las fórmulas del movimiento circular uniforme (MCU) calcularé el período de rotación del Sol.
- Etapa 5: Con un programa de tratamiento de imágenes calcularé el tamaño aparente de algunas manchas solares y luego lo expresaré en kilómetros. Al principio no era consciente de que las manchas solares eran tan grandes, y al darme cuenta de ello decidí compararlas con el tamaño de la Tierra.

### 3. Fundamentos teóricos

#### 3.1. El Sol, nuestra estrella

El Sol se encuentra situado en un brazo de la Vía Láctea llamado Orión, en el supercúmulo denominado Local y el cúmulo del Grupo Local, a 27.000 años luz del centro de la misma.

Es el responsable principal de la existencia de vida en la Tierra, del clima, la situación y la composición de cualquier planeta del Sistema Solar y también de numerosos efectos en la Tierra (tormentas electromagnéticas, auroras boreales...) y en otros planetas. Aunque no destacaría en un firmamento observado desde otro punto de la Vía Láctea, resulta indispensable para el Sistema Solar, formado por ocho planetas, diversos planetas enanos, varios miles de millones de asteroides, numerosos satélites y millones de cometas, alcanzando una distancia de 18 billones de km (121 AU<sup>2</sup>) desde el Sol hasta la heliopausa<sup>3</sup>.

El Sol constituye el 99,8% de la masa del Sistema Solar, y debido a su elevada fuerza gravitatoria atrae a todos los otros astros cercanos a él para que orbiten a su alrededor, constituyendo el centro del Sistema Solar, el punto más fundamental de nuestro mundo.

Se calcula, no obstante, que en la Vía Láctea hay aproximadamente 200.000 millones de estrellas y que existen miles de millones de galaxias, lo cual nos da una idea de la inmensidad del universo.

##### 3.1.1. Características generales

El Sol es una estrella de tamaño mediano, de tipo G2 y clase V. Esto significa que tiene un espectro amarillento, no es muy caliente y está situada en la secuencia principal (ver apéndice 1).

Gracias al espectroscopio, inventado por Robert Bunsen y Gustav Kirchoff<sup>4</sup>, se conoce su composición: 70-74% hidrógeno, 27-23% helio y 3% otros elementos (contiene 80 de los 90 elementos naturales restantes), casi todos ellos en estado de plasma.

El Sol (y con él todo el Sistema Solar) tiene un movimiento propio en relación a la galaxia, desplazándose a 20km/s (72.000km/h) hacia la constelación de Hércules, cerca de la estrella Vega.

---

<sup>2</sup>Una UA (unidad astronómica) equivale a 149.597.870.700m, o la distancia media entre la Tierra y el Sol

<sup>3</sup>Frontera entre el Sistema Solar y el espacio interestelar, donde el viento solar se une al medio interestelar o al viento solar procedente de otras estrellas, aproximadamente a 120AU

<sup>4</sup>Robert Bunsen (1811 - 1899) y Gustav Kirchoff (1824 - 1877), científicos alemanes

En el Sol existe un equilibrio, denominado **equilibrio hidrostático**, entre la presión del núcleo y la fuerza de la gravedad, ya que sino explotaría. Se produce cuando la compresión (fuerza de la gravedad hacia el interior) se equilibra con las fuerzas de presión y radiación (resultado de la energía térmica creada por fusión nuclear, que actúan hacia el exterior).

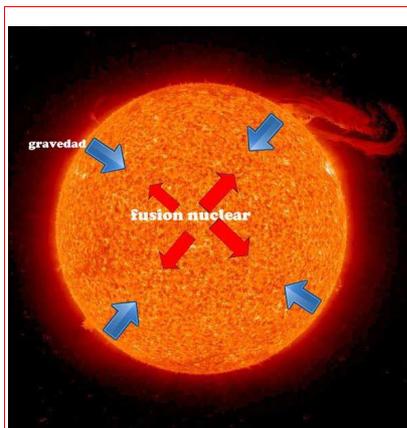


Imagen 1: Equilibrio hidrostático.  
Fuente:  
<http://www.taringa.net/post/ciencia-educacion/17815550/Entra-te-explico-que-es-una-supernova.html>

En la siguiente tabla se detallan las características generales del Sol, y las relaciones con la Tierra:

Magnitud	Sol	Comparación Sol – Tierra
Masa	$2 \cdot 10^{30}$ kg	x333.000 masa Tierra
Volumen	$1,41 \cdot 10^{18}$ m <sup>3</sup>	x1.000.000 volumen Tierra
Radio	695.000 km	x109,3 radio Tierra
Temperatura superficial	6.000 °C	14,04°C en la Tierra
Temperatura núcleo	15.000.000 °C	6.700 °C en la Tierra
Rotación	25 días ecuador / 30 días polos	23h 56m 4s
Distancia Tierra	149.600.000 km	
Tipo espectral	G2 de la secuencia principal	
Magnitud aparente <sup>5</sup>	-26,8	
Magnitud absoluta <sup>6</sup>	4,8	

Tabla 1. Principales magnitudes del Sol y en comparación a la Tierra

En los apéndices se resumen otras características importantes del Sol, interesantes para comprender mejor todo lo que veremos a continuación: ciclo de vida (apéndice 2) y estructura (apéndice 3).

### 3.1.2. Como se genera la energía

El Sol desprende radiación en todas las longitudes de onda, desde rayos gamma hasta ondas de radio. Aún así, nosotros solo percibimos directamente la luz visible. Esta energía emerge de la fotosfera y nos llega a la Tierra en 8 minutos y 19 segundos, viajando a la

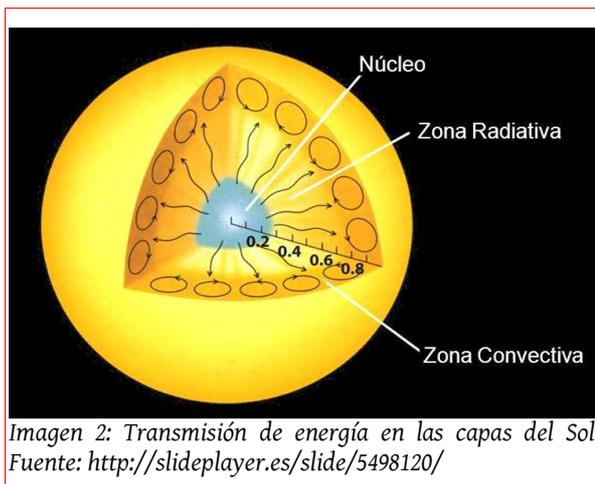
<sup>5</sup>Brillo de una estrella en el cielo desde la Tierra. Fuente: “Astronomía. RIDPATH, IAN”

<sup>6</sup>Brillo real de una estrella, a una distancia de 32,6 años luz. Fuente: “Astronomía. RIDPATH, IAN”

velocidad de la luz<sup>7</sup>. Sin embargo el proceso mediante el cual se obtiene esta energía es mucho más largo.

Se produce en el núcleo solar, el funcionamiento del cual empezó a conocerse a principios del siglo XX, cuando se descubrió que los núcleos atómicos no son inmutables. El proceso fue descrito en 1938 por Hans Bethe<sup>8</sup> como **cadena protón-protón**, y se basa en la **fusión nuclear**, utilizando la famosa fórmula de Einstein  $E=mc^2$ . Los átomos de hidrógeno del núcleo se fusionan convirtiéndose en helio y desprenden una gran cantidad de energía luminosa y calorífica (entre otras). Este proceso requiere altísimas temperaturas y presiones, por lo tanto no se puede realizar en un laboratorio ni en una central nuclear convencional (ver detalladamente en el apéndice 4)

La energía generada asciende la zona radiante y la zona convectiva para emerger a la fotosfera. Este proceso es muy lento ya que dura unos 10 millones de años. Esta energía atraviesa la **zona radiante** ascendiendo como rayos X y rayos gamma, invisibles y muy lentamente, recorriendo distancias cortas ya que son absorbidos por átomos de hidrógeno y emitidos otra vez en otra dirección. Al enfriarse, esta energía se convierte en radiación ultravioleta y luz visible. La **zona convectiva**, es traspasada mediante convección: los rayos calientes que se encuentran en el interior salen en columnas y burbujeano hacia la fotosfera, y los que se encuentran en el exterior descienden ya que tienen una densidad más elevada.



Cada segundo reaccionan 700 millones de toneladas de hidrógeno, combustible que también se va gastando, pero aunque ya lleve unos 4.600 millones de años emitiendo energía lo seguirá haciendo unos 5.000 millones de años más.

### 3.2. Actividad solar

#### 3.2.1. Campo magnético

Los elementos que forman el Sol se encuentran en estado de plasma. Debido a su elevada

<sup>7</sup>Velocidad de la luz (c): 299.792.458 m/s

<sup>8</sup>Hans Albrecht Bethe, 1906 – 2005, físico alemán-estadounidense, ganador del Premio Nobel de Física en 1967 por su descubrimiento de la nucleosíntesis estelar

ionización y a la rotación diferencial (el ecuador gira con mayor velocidad angular que las zonas polares: períodos de 25 días en el ecuador y 30 en los polos) se genera un fuerte campo magnético (un promedio de 50 Gauss<sup>9</sup>, 100 veces mayor que el de la Tierra) que se puede visualizar mediante líneas de fuerza magnética<sup>10</sup>. Este campo magnético es el responsable de la actividad solar y de la forma en qué se expresa, siendo su origen y funcionamiento áreas de investigación actuales.

Se ha constatado que hay regiones con un campo magnético superior que otras, y que la polaridad de cada hemisferio cambia cada 22 años. Esto se explica a partir de la **teoría dinamo**:

Al inicio del ciclo solar, el campo magnético se encuentra en dirección al eje de rotación del Sol y en las capas más bajas de la capa convectiva (**campo poloidal**), pero el plasma hace que las líneas del campo magnético se encuentren congeladas en éste y sigan su movimiento. Debido a la rotación diferencial, las líneas de fuerza magnética se alargan como si fueran gomas elásticas, distorsionándose lateralmente (**campo toroidal**). Las líneas están más juntas, por lo tanto se refuerza la intensidad del campo creando tubos con un campo más elevado que suben a la fotosfera generando a su vez las regiones activas. Ésta primera parte del ciclo dura unos 4 años. En la segunda, que

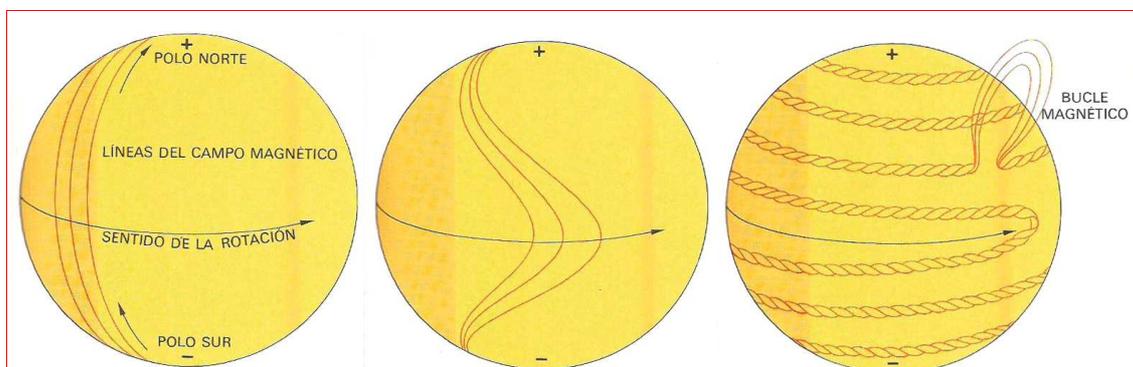


Imagen 3: Teoría de la dinamo debido a la rotación diferencial y con las líneas de campo magnético. Izquierda: campo poloidal. Medio i derecha: campo toroidal. Fuente: "El Sistema Solar. FRAZIER, KENDRICK"

dura unos 7 años, el campo se disipa, disminuye su actividad y vuelve a una nueva configuración de campo poloidal pero de polaridad contraria al anterior.

Esta teoría explica los ciclos de actividad solar. Cuando las líneas de fuerza magnética

<sup>9</sup>Gauss (G): unidad de campo magnético nombrada en honor del matemático y físico alemán Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855)

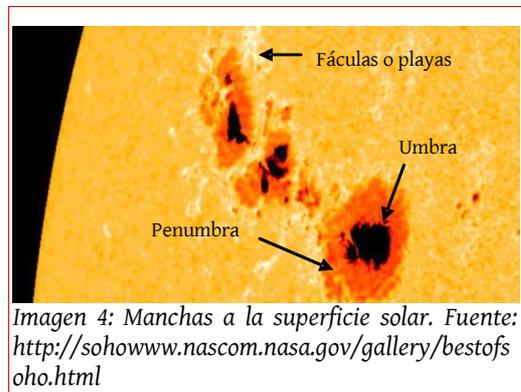
<sup>10</sup>La materia ionizada tiende a circular a lo largo de las líneas de fuerza magnética, ya que en éstas no experimentan resistencia, pero si intenta cruzarlas se genera una fuerza resultante que se opone al movimiento de la partícula. Se dice que el campo está congelado en la materia, ya que están fuertemente acoplados. Donde la energía cinética de la materia sea mayor, las líneas del campo magnético serán distorsionadas y seguirán el movimiento de la materia. Fuente: <http://achaya.cl/radioastronomia/125-manchas>

se encuentran más unidas tenemos un máximo de actividad solar, y cuando se desenlazan tenemos mínimos. Esto ocurre cada 11 años, el cual se repite luego con la polaridad invertida, completando así el ciclo magnético de 22 años.

El campo magnético se confina en la fotosfera representándose en zonas concretas como *manchas solares*, *fáculas* y *poros*. En la cromosfera el campo también se manifiesta en forma de *protuberancias* y *fulguraciones*. Y la corona, también determinada por el campo magnético, presenta zonas libres, llamadas agujeros coronales, por donde el campo se propaga en el espacio en forma de *viento solar*.

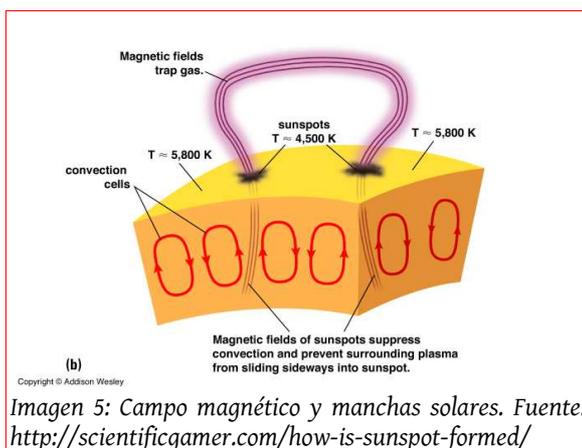
### 3.2.2. Manchas solares

Los primeros estudios de manchas solares se sitúan en el año 28 a.C. y fueron realizados por astrónomos chinos, los cuales probablemente observaban las manchas solares más grandes visibles desde la Tierra. Las primeras observaciones con telescopio se realizaron en 1610 por David Fabricius, Johannes Fabricius, Galileo Galilei y Schneider.



Se trata de zonas oscuras proyectadas en la superficie, debido a su más baja temperatura (entre 2.000 y 4.000 °C) y son resultado de intensos campos magnéticos. Están formadas por una parte central llamada **umbra** (de color negro, a 2.000°C), donde el campo magnético es vertical, y alrededor una parte llamada **penumbra** (4.000°C), un poco más clara y de aspecto filamentoso, ya que el campo

está más inclinado. Los tubos de flujo de campo magnético que sobresalen hacia la fotosfera cierran el paso a las corrientes de convección de plasma, inhibiendo la emisión de energía que procede del núcleo, ello provoca que estas zonas se encuentren a menor temperatura que sus alrededores, y como consecuencia de este contraste, que las veamos más oscuras (aunque si pudiéramos ver una mancha del tamaño de la Tierra, aislada y a la misma distancia que



el Sol, la veríamos 50 veces más brillante que la Luna llena). Su forma y tamaño son variables, aunque su diámetro habitualmente oscila entre 10.000 y 30.000 km, y suelen

durar unos días, aunque puede oscilar de horas a meses. Son relativamente inmóviles con respecto a la fotosfera, participan de la rotación solar y son un claro índice de la actividad solar (puede haber más de 200 en el máximo y ninguna en el mínimo).

Aparecen en grupos (ya que el campo magnético sale por un punto de la superficie y se introduce por otro) normalmente dominados por dos grandes manchas alineadas en el sentido de la rotación solar: delantera o p (*preceeding*) y trasera o f (*following*). La polaridad es positiva en una parte del grupo y negativa en la otra, y a través de ellas fluye el campo magnético (comportándose como imanes) formando arcos que provocan fulguraciones y protuberancias. La polaridad de los grupos es opuesta en los dos hemisferios: si en uno es positiva la parte delantera, en el otro es positiva la trasera, y se invierte cada 22 años. Tiende a invertirse un año después del máximo de manchas solares, porque el incremento de actividad es más rápido que el descenso (unos 4 años de aumento y unos 7 de descenso). Este cambio no siempre ocurre simultáneamente (por ejemplo, en 1957 el polo negativo magnético se convirtió en polo positivo, pero el polo positivo magnético no se convirtió en negativo hasta finales de 1958).

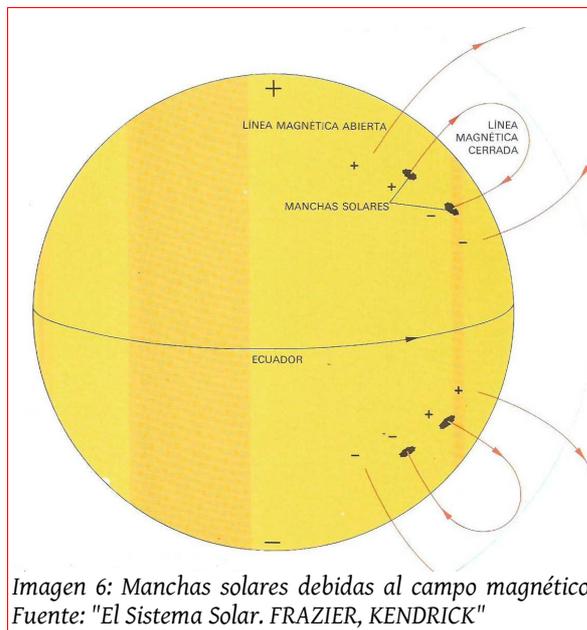


Imagen 6: Manchas solares debidas al campo magnético  
Fuente: "El Sistema Solar. FRAZIER, KENDRICK"

El número de manchas y su posición sigue el ciclo de actividad solar y se conoce como Ley de Spörer<sup>11</sup>, representándose gráficamente en el diagrama de mariposa según las coordenadas heliográficas (ver apartado 6). Aparecen en dos bandas de actividad, una al norte y la otra al sur del ecuador. Al inicio del ciclo, cuando la actividad solar aumenta, la latitud media de las bandas es de  $\pm 30^\circ$ . Mientras evoluciona el ciclo, bajan su latitud y a la mitad del ciclo se sitúan a  $\pm 12^\circ$ . Al final del ciclo, las manchas que aparecen se forman a  $\pm 5^\circ$ . Por lo tanto las manchas se encuentran alrededor del ecuador, sin cruzarlo y nunca en los polos. Un ciclo se puede sobreponer al anterior durante unos dos años. Actualmente estamos en el ciclo 24, que empezó en 2008, y en 2013 experimentó el máximo de actividad, estando actualmente en fase de descenso.

Existen dos tipos especiales:

<sup>11</sup>Friedrich Wilhelm Gustav Spörer, 1822 – 1895, astrónomo alemán

- Poros: son manchas solares de pequeñas dimensiones (unos 1.000km), normalmente puntuales y en las que no se distingue penumbra.
- Fáculas o playas: son puntos brillantes que acompañan a las manchas solares y son más calientes que su alrededor y de mayor luminosidad. Son zonas con una elevada probabilidad de contener manchas en un futuro. Duran varias semanas.

### 3.2.3. Protuberancias

Las protuberancias son inmensas llamaradas en forma de lazo o de arco que se alzan desde la cromosfera y caen de nuevo en ésta. Se extienden en la corona solar, pueden ser inactivas (arcos brillantes de larga duración pero sin efectos en la Tierra ya que se extienden como máximo 200.000km) o activas (arcos solo con horas de vida pero con efectos en la Tierra y que circulan a millones de km/h). Las protuberancias producen ondas de choque en la corona y se convierten en protuberancias coronales.



Imagen 7: Protuberancia comparada con la Tierra. Fuente: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/bestofsoho.html>

### 3.2.4. Fulguraciones

En las regiones magnéticamente activas la energía se acumula en un bucle magnético inestable, y al final explota lanzando una cantidad de materia al espacio que viaja a 4,3 millones de km/h, y por lo tanto pueden afectar a la Tierra. Lanza rayos X, rayos gamma y otras formas de energía que viajan a través del viento solar y perturban el campo magnético terrestre, causando tormentas geomagnéticas y alteraciones de la electricidad, el voltaje y la corriente eléctrica. También se intensifica, en latitudes más bajas, la aparición de auroras boreales. Richard Christopher Carrington<sup>12</sup> fue el primer astrónomo en observar una fulguración.

### 3.2.5. Viento solar

El Sol emite constantemente partículas que se mueven sobre las líneas del campo magnético y se extienden al espacio de manera muy poco densa (4-5 partículas/cm<sup>3</sup>). Se trata de un flujo continuo de partículas y es el responsable de diversos efectos en la Tierra, como interferencias en los sistemas de comunicaciones o auroras boreales y australes (el campo magnético del Sol se desplaza con el viento solar y excita a los átomos de la parte superior de la atmósfera que emiten luz de determinados colores). Gracias al estudio de

<sup>12</sup>Richard Crhistopher Carringotn, 1826 – 1875, astrónomo inglés, que en 1859 observó por primera vez una fulguración, y en 1863 descubrió la rotación diferencial gracias a las manchas solares

manchas solares con satélites como el SOHO<sup>13</sup> y el SDO<sup>14</sup>, o centros como el Solar Influences Data Analysis Center de Bélgica<sup>15</sup> y el Space Weather Prediction Center<sup>16</sup> se pueden predecir estos efectos.

**Mi trabajo se centrará en las manchas solares**, ya que son las que mejor indican el nivel de actividad solar y, además, es el único fenómeno solar que puedo estudiar con los recursos de los que dispongo.

---

<sup>13</sup>El “Solar and Heliospheric Observatory” es una sonda espacial lanzada en 1995 para estudiar el Sol. Es un proyecto conjunto entre la ESA (European Space Agency) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration): <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

<sup>14</sup>El “Solar Dynamics Observatory” es un telescopio espacial lanzado el 2010 como un proyecto de la NASA: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>

<sup>15</sup>SIDC: <http://sidc.oma.be/>

<sup>16</sup>National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA): <http://www.swpc.noaa.gov/>

## 4. Captura y tratamiento de las imágenes

### 4.1. Captura

De todos es conocido que el Sol no puede observarse directamente. Para hacerlo se utilizan unos telescopios y filtros con unas características específicas. El telescopio que he usado es el **Coronado PST** (Personal Solar Telescope), un buen telescopio para la observación del Sol y del cual hay dos versiones: H-alpha y **Ca-K**. He trabajado con el modelo Ca-K, propiedad de la AAG. En el apéndice 5 se describen las características de este telescopio.

La asociación me instruyó en el manejo del telescopio y me proporcionó los vídeos del Sol que ellos habían grabado durante el año 2014 y parte del 2015 (dos o tres vídeos por mes). En septiembre de 2015 yo misma grabé varios vídeos para aprender a utilizar el telescopio y la cámara. Las observaciones astronómicas pueden verse afectadas por diversos factores, y la observación del Sol no es una excepción. Los dos primeros días que acudí al observatorio de Llagostera no pude realizar ninguna observación debido a la presencia de nubes y viento. El tercer día pude tomar vídeos, pero la **cámara QhyCCD** que se había utilizado en todas las observaciones no funcionaba, y tuve que usar una cámara de menor resolución (Philips Toucam). El proceso para captar la imagen, indistintamente de la cámara utilizada, es el siguiente:

En primer lugar se enfoca el telescopio Coronado PST Ca-K hacia el Sol. Con la ayuda de una pequeña pantalla acoplada al telescopio se busca el mejor enfoque posible, teniendo en cuenta que el Sol debe quedar en el centro de la imagen. Con un mando se puede girar ligeramente el telescopio colocando la imagen del Sol justo en medio de la pantalla. Una vez enfocado se escoge la resolución del vídeo para obtener una imagen de máxima calidad y se empieza a grabar. Utilizando la cámara Philips Toucam no dispone de una imagen del Sol completa y se aprecian menos detalles que con la QhyCCD. Todas las imágenes se visualizan de color azul-violeta debido al filtro que lleva incorporado el telescopio.



Imagen 8: El Sol a partir del vídeo que tomé el 26/09/15 con el telescopio Coronado PST Ca-K y la cámara Philips Toucam. Fuente: propia

## 4.2. Tratamiento

Cada día se capturan varios vídeos y después yo escogí aquél en que se ve la imagen más nítida y con menos turbulencias (en algunos se veían pasar nubes, aviones e incluso la estación espacial internacional). Finalmente he seleccionado 38 vídeos (32 de 2014 y 6 de 2015).

Con el programa **RegiStax 6**<sup>17</sup>, muy utilizado en astronomía, he convertido estos vídeos en imágenes de alta resolución para analizar las manchas solares. Este programa selecciona los mejores fotogramas que componen los vídeos para obtener una imagen más detallada y de mejor resolución. En primer lugar, se escoge uno de los mejores fotogramas del vídeo (eran vídeos de aproximadamente un minuto, es decir unos 500 fotogramas) y el programa selecciona los fotogramas similares al escogido en un porcentaje determinado de similitud (en este trabajo utilicé el 85%). En segundo lugar se fusionan todos los fotogramas seleccionados y se concluye seleccionando la cantidad de píxeles que deseamos en cada franja para mejorar la resolución. A través de este procedimiento se consiguen imágenes de mejor calidad que si fueran capturadas directamente del telescopio.

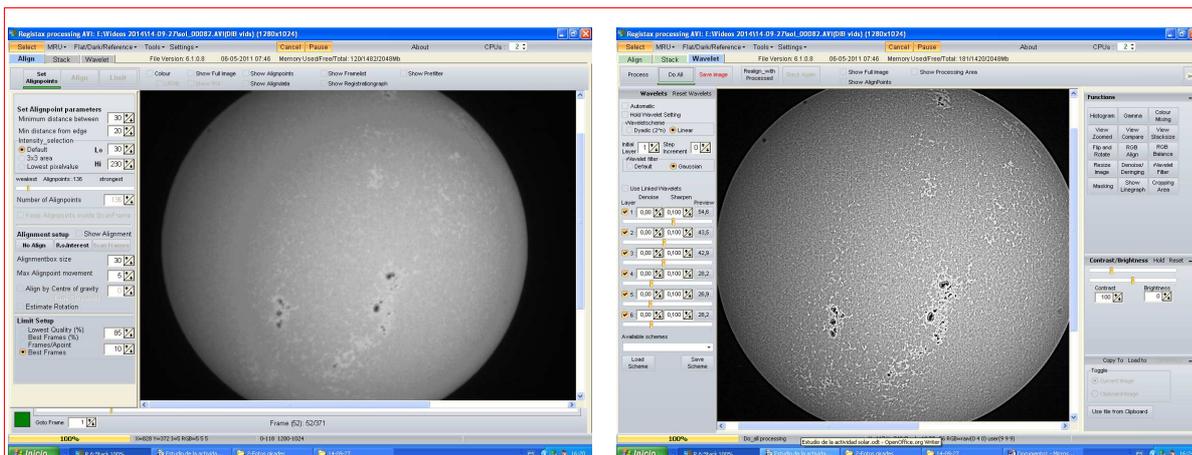


Imagen 9: Proceso de tratamiento de las imágenes con el programa RegiStax del Sol del día 27/09/14. Izquierda: selección del mejor fotograma. Derecha: selección de la cantidad de píxeles. Fuente: propia

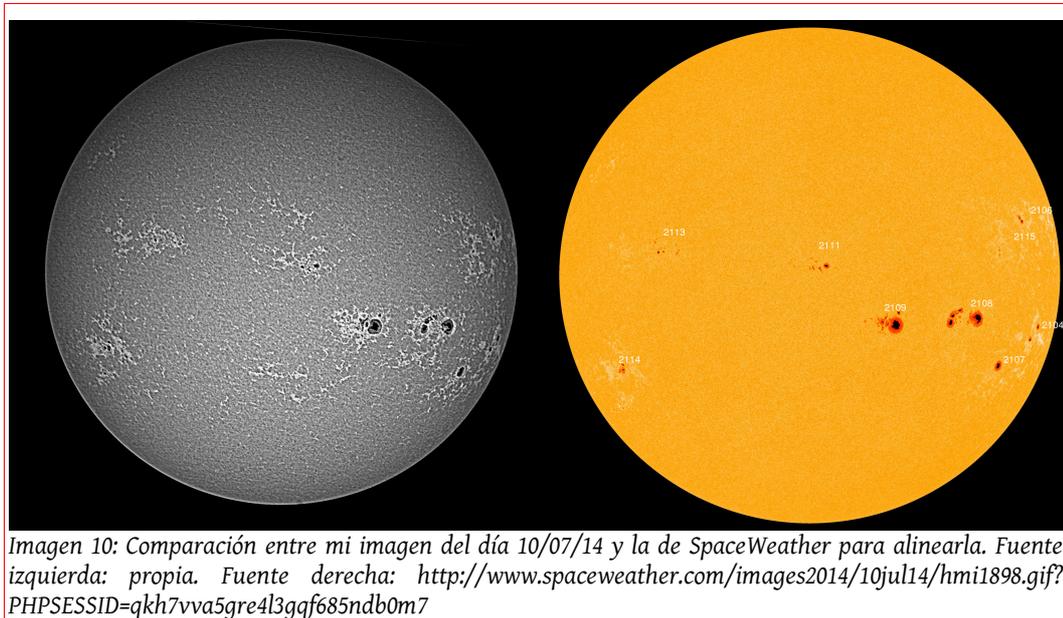
El Sol está inclinado respecto a la Tierra y esta inclinación va variando. Así pues, para conocer la posición exacta de las manchas solares tuve que girar las imágenes corrigiendo el ángulo entre el norte del disco solar y el eje de rotación. También apliqué el efecto espejo para que quedasen tal y como está consensuado (norte arriba y este a la izquierda). Para hacerlo he utilizado como modelo la página web Space Weather<sup>18</sup> (SW), en la que hay imágenes del Sol diarias desde 2001. Utilizando el **Photoshop**<sup>19</sup> y sirviéndome de plantilla

<sup>17</sup>De descarga gratuita

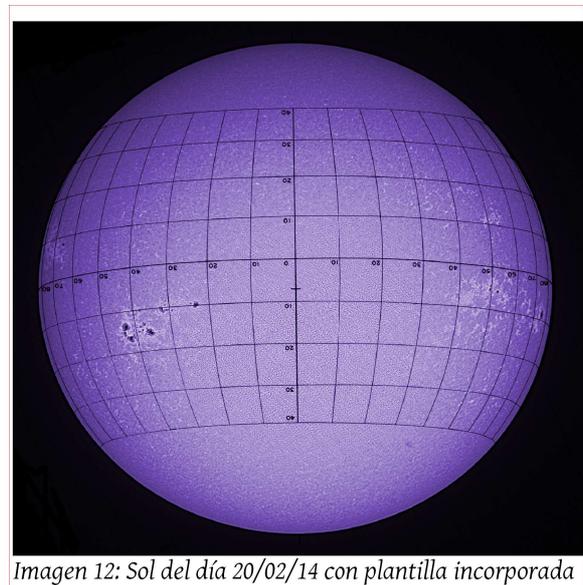
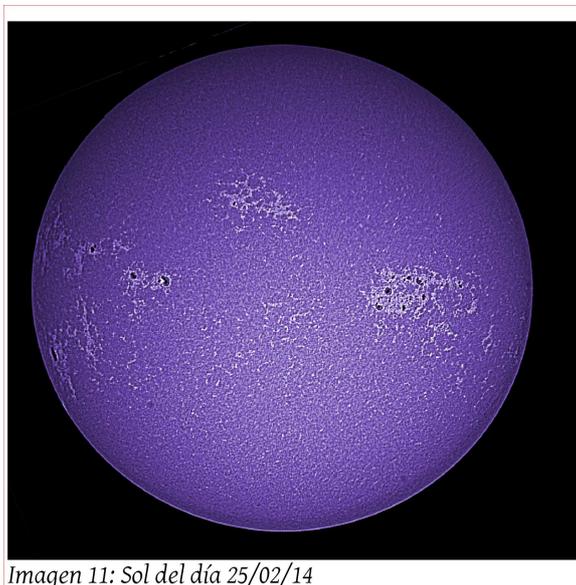
<sup>18</sup>Es una web elaborada en colaboración de la NASA, NOAA y otras asociaciones astronómicas internacionales y se considera que contiene los datos más rigurosos obtenidos: spaceweather.com

<sup>19</sup>Obtención propia

la imagen de SW, roté mi imagen hasta darle la misma orientación.



Durante todo este proceso he trabajado con las imágenes en blanco y negro ya que el ojo humano no es muy sensible a la longitud de onda del Ca-K. Pero finalmente he añadido el filtro Ca-K y el resultado han sido imágenes de color azul-violeta con mucha resolución.



En las imágenes se distinguen las manchas solares y los poros (regiones oscuras) y las playas o fáculas (regiones claras y brillantes), visibles gracias al filtro Ca-K.

El resto de imágenes se pueden consultar en la web de la AAG: <http://www.astrogirona.com/projectes2/>

## 5. Cálculo de la actividad solar. Número de Wolf

### 5.1. Número de Wolf

Las manchas solares fueron estudiadas por primera vez con telescopios alrededor de 1610, pero fue en 1843, cuando el alemán Schwabe<sup>20</sup> definió la duración del ciclo solar en base al número de manchas (ver 3.2.1). En 1848, el astrónomo suizo Rudolf Wolf<sup>21</sup> determinó un valor más preciso del ciclo en 11 años, y publicó la primera fórmula para cuantificar la actividad solar. Se le conoce como **número de Wolf** o de **Zúrich** y es un índice calculado a partir del número de grupos y de manchas solares.

Con este simple recuento se confirmó el ciclo de la actividad solar y se pudo relacionar y estudiar la misma de forma retrospectiva, desde la época de Galileo Galilei<sup>22</sup> (4 siglos). Este índice no tiene en cuenta la superficie de las manchas y aunque Wolf pensaba que su área era un mejor indicador optó por un cálculo más sencillo. Su simplicidad hace que sea el cálculo en astronomía que más haya perdurado a lo largo de los tiempos, aunque continúe siendo discutido por su poca precisión. Se han intentado otros sistemas de cálculo (número Grupo, índice de McIntosh, superficie total de las manchas...) pero los científicos han concluido que el número de Wolf era el mejor indicador. Al tratarse de un recuento impreciso, un buen conocimiento de la naturaleza y el comportamiento de las manchas es de gran ayuda.

Antes de calcular el número de Wolf es importante conocer algunos aspectos:

- Grupo de manchas: conjunto de manchas y poros próximos entre sí y que evolucionan de forma conjunta. La clasificación de Zürich (apéndice 6) es de gran ayuda para el recuento
- Focos: se denominan así las manchas y los poros individuales

El número de Wolf se calcula de la siguiente forma:

$$R = k \cdot (10g + f) \quad , \text{ donde}$$

$R$ es el número de Wolf o número relativo de manchas solares
---------------------------------------------------------------

$K$ es un factor de corrección estadístico que varía en función a la calidad del observatorio (situación del observatorio, condiciones atmosféricas y tipo de telescopio). Es un valor que tiene sentido cuando se desea agrupar diversas observaciones, y lo rige el centro coordinador. Yo no haré esto, por lo tanto el valor utilizado es 1 (valor por defecto)
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

---

<sup>20</sup>Samuel Heinrich Schwabe, astrónomo alemán, 1789 – 1875, Dessau, Alemania

<sup>21</sup>Johann Rudolf Wolf, astrónomo suizo, 1816 – 1893, Zürich, Suiza

<sup>22</sup>Galileo Galilei, astrónomo, filósofo, ingeniero, matemático y físico italiano, 1564 – 1642, Pisa – Arcetri, Italia

$g$  es el número de grupos de manchas solares (un foco aislado también se considera un grupo). Este factor es el que introduce mayor imprecisión, ya que hay gran ambigüedad en el concepto de grupo, especialmente cuando son muy pequeños o están en la misma región activa. A veces la única forma de distinguir dos grupos es observar su evolución

$f$  es el número de manchas individuales, incluidos poros y umbras (focos). Si en la misma penumbra hay más de un núcleo cada uno se contará como una mancha distinta. No existe un criterio estándar pero en general los poros de pequeño tamaño no son incluidos en el recuento.

La actividad mínima es 0 (en caso de que no haya ningún foco), siendo el siguiente valor posible 11 (un foco), y a partir de aquí cualquier valor consecutivo de los números naturales.

### 5.2. Cálculo del número de Wolf

De cada imagen generada he contado todos los grupos de manchas y los focos. Esto implica cierta imprecisión, ya que diferentes observadores probablemente no contarían el mismo número de manchas en la misma imagen y por lo tanto obtendrían resultados distintos (más adelante veremos como minimizar esto). Luego los he anotado en un Excel en el cual he introducido la fórmula del número de Wolf, generando la tabla que vemos a continuación de las 38 imágenes de las que dispongo.

	k	g	f	R		k	g	f	R
07/01/2014	1	5	44	94	27/06/2014	1	2	5	25
28/01/2014	1	4	13	53	05/07/2014	1	9	22	112
29/01/2014	1	5	16	66	10/07/2014	1	7	26	96
12/02/2014	1	6	23	83	17/07/2014	1	1	1	11
20/02/2014	1	5	34	84	31/07/2014	1	4	20	60
25/02/2014	1	6	36	96	12/08/2014	1	4	9	49
07/03/2014	1	5	22	72	18/08/2014	1	6	11	71
14/03/2014	1	4	18	58	27/09/2014	1	6	40	100
17/03/2014	1	3	8	38	23/10/2014	1	6	32	92
05/04/2014	1	6	22	82	28/10/2014	1	3	14	44
09/04/2014	1	5	7	57	13/11/2014	1	3	15	45
16/04/2014	1	6	26	86	20/11/2014	1	5	12	62
09/05/2014	1	4	16	56	23/12/2014	1	4	7	47
14/05/2014	1	6	15	75	17/01/2015	1	2	7	27
18/05/2014	1	3	8	38	22/01/2015	1	3	5	35
21/05/2014	1	4	9	49	09/02/2015	1	4	7	47
05/06/2014	1	3	6	36	20/02/2015	1	3	13	43
07/06/2014	1	5	21	71	27/05/2015	1	2	3	23
19/06/2014	1	4	11	51	17/06/2015	1	3	16	46

Tabla 2: Número de Wolf (observador 1)

A continuación he diseñado un gráfico con los 38 resultados del número de Wolf para ver su variación a lo largo del año 2014 y parte del 2015. El gráfico obtenido es el siguiente:

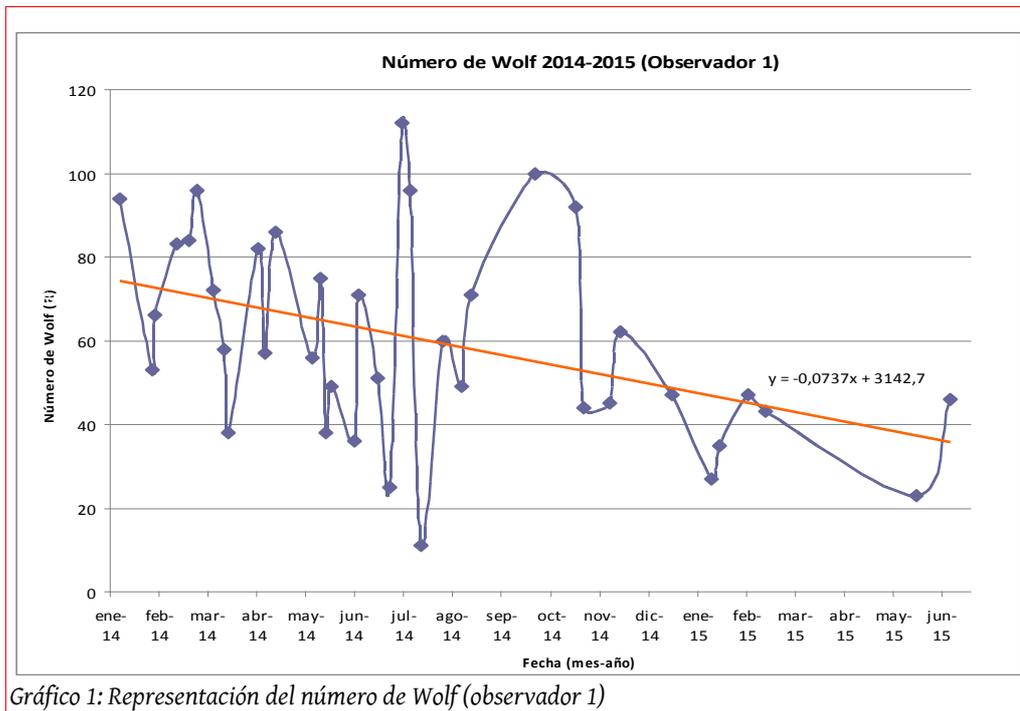


Gráfico 1: Representación del número de Wolf (observador 1)

Consideramos que R no tienen incertidumbre, ya que el error lo calcularé en el análisis estadístico posterior.

Podemos ver que el número de Wolf no sigue ninguna ecuación (recta, parábola...) sino que puede variar completamente de un día a otro. Esto es debido a que las manchas solares tienen una duración corta (de unas horas a unos días), y las imágenes son de semanas distintas, por lo tanto el índice de actividad solar puede haber variado completamente. Vemos un máximo absoluto el 5/07/14 y un mínimo el 17/07/14. Por lo tanto, en poco más de una semana pasa de  $R=112$  a  $R=11$ .

Aún así, la línea de tendencia nos marca claramente que la actividad solar en general disminuye a lo largo de 2014 y 2015, ya que es una recta decreciente (con pendiente negativa). Esto se corresponde a lo que ya hemos afirmado, puesto que en este momento la actividad solar está disminuyendo desde el máximo registrado en 2013 hasta 2019, aproximadamente, cuando se calcula que llegará a su mínimo.

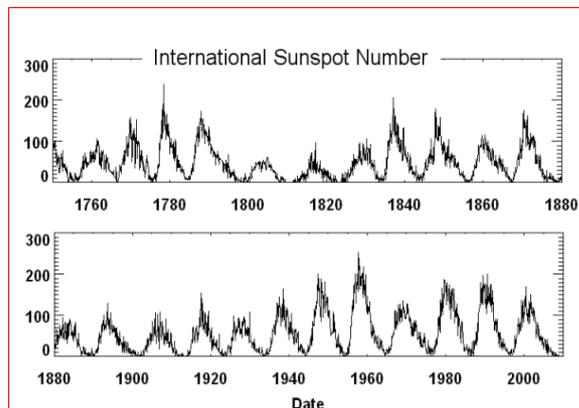


Imagen 13: Representación del ciclo del número de Wolf desde 1760 hasta 2000. Fuente: <http://spaceweather.com/glossary/sunspotnumber.html>

Para mejorar la precisión, decidí registrar otros tres observadores, y con los datos obtenidos de sus observaciones realicé la misma tabla y el mismo gráfico (apéndice 7).

Seguidamente elaboré la tabla y el gráfico con los datos de los cuatro observadores y haciendo la media de cada resultado. Así obtenemos los mejores resultados, ya que se compensan los posibles errores de observación.

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{4}$$

También calculé la desviación estándar de cada resultado, lo cual nos da una idea de la incertidumbre de cada medición:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}$$

(N es el número de observadores)

La incertidumbre del promedio será:

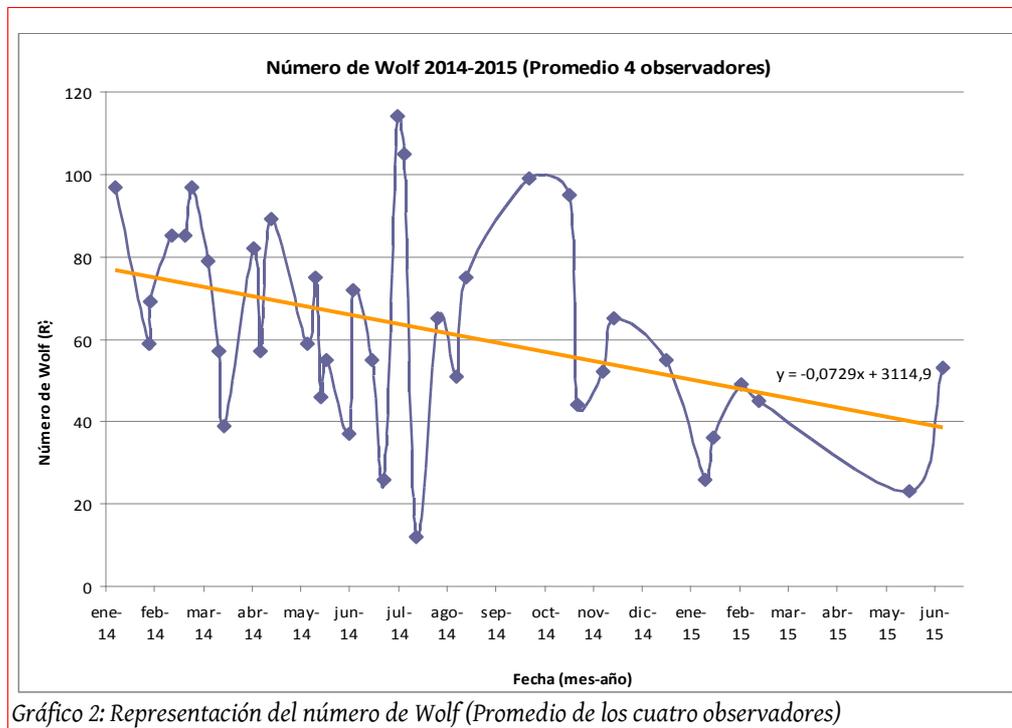
$$\Delta \bar{R} = \frac{\sigma_R}{\sqrt{N}}$$

	Observ. 1	Observ. 2	Observ. 3	Observ. 4	Mitjana	Desviació		Observ. 1	Observ. 2	Observ. 3	Observ. 4	Mitjana	Desviació
07/01/2014	94	98	97	99	97	1,08	27/06/2014	25	27	25	27	26	0,58
28/01/2014	53	54	63	64	59	2,90	05/07/2014	112	116	114	115	114	0,85
29/01/2014	66	70	67	72	69	1,38	10/07/2014	96	107	106	110	105	3,04
12/02/2014	83	86	86	84	85	0,75	17/07/2014	11	11	13	13	12	0,58
20/02/2014	84	84	87	83	85	0,87	31/07/2014	60	75	62	64	65	3,35
25/02/2014	96	94	97	99	97	1,04	12/08/2014	49	51	51	53	51	0,82
07/03/2014	72	74	84	85	79	3,35	18/08/2014	71	75	75	77	75	1,26
14/03/2014	58	58	55	58	57	0,75	27/09/2014	100	104	91	99	99	2,72
17/03/2014	38	40	39	40	39	0,48	23/10/2014	92	100	93	95	95	1,78
05/04/2014	82	82	81	81	82	0,29	28/10/2014	44	44	43	43	44	0,29
09/04/2014	57	57	58	57	57	0,25	13/11/2014	45	60	45	58	52	4,06
16/04/2014	86	90	85	96	89	2,50	20/11/2014	62	64	62	72	65	2,38
09/05/2014	56	68	55	57	59	3,03	23/12/2014	47	58	57	57	55	2,59
14/05/2014	75	76	73	76	75	0,71	17/01/2015	27	26	25	26	26	0,41
18/05/2014	38	49	48	48	46	2,59	22/01/2015	35	35	37	36	36	0,48
21/05/2014	49	61	60	51	55	3,07	09/02/2015	47	48	50	49	49	0,65
05/06/2014	36	38	36	37	37	0,48	20/02/2015	43	45	44	47	45	0,85
07/06/2014	71	75	72	71	72	0,95	27/05/2015	23	23	23	23	23	0,00
19/06/2014	51	53	51	65	55	3,37	17/06/2015	46	48	60	58	53	3,51

Tabla 3: Número de Wolf (Promedio de los cuatro observadores y desviación del este promedio)

La desviación más elevada de todas es 4,06 el 13/11/14, pero la mayoría no llegan a 3. El día 27/05/15 hay una desviación de 0, ya que los cuatro observadores coincidimos exactamente en el número de Wolf. Aunque hay desviaciones muy variadas, la mayoría son muy bajas, y el promedio es bastante similar al valor de cada observador.

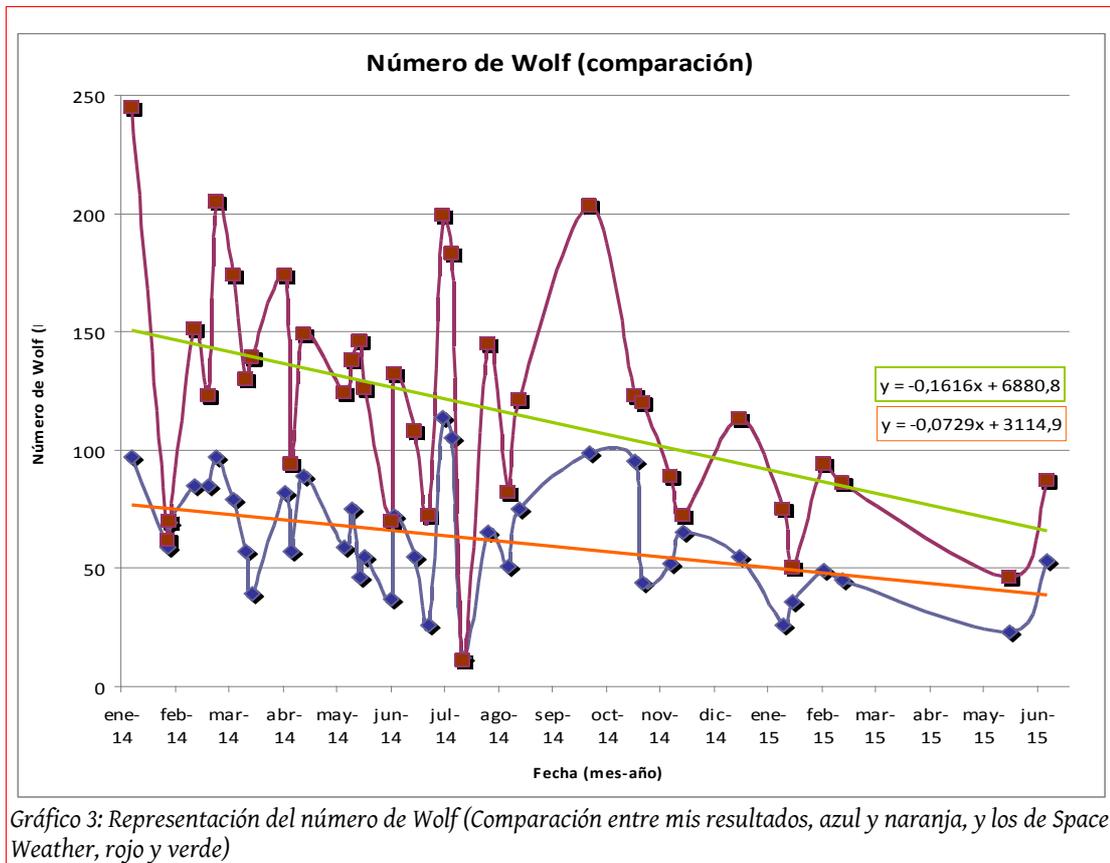
Este es el gráfico resultante:



En teoría este gráfico sería el más exacto, por lo tanto utilizaré estos últimos datos para comparar mis resultados con los “oficiales” y calcular el error.

### 5.3. Comparación con los resultados de Space Weather

Como he dicho antes, el número de Wolf puede variar dependiendo del telescopio utilizado e incluso del observador. Por este motivo he decidido comparar mis resultados con los de Space Weather (SW), portal especializado en meteorología solar, que diariamente sube imágenes del Sol realizadas con el satélite SDO/HMI y calcula el número de Wolf. Éste es uno de los dos números de Wolf reconocidos internacionalmente como oficiales (yo lo consideraré el valor real):



Vemos que los dos gráficos son muy parecidos, ya que siguen la misma tendencia y hay extremos absolutos en el mismo día en ambos gráficos; pero los resultados de SW son más elevados que los míos debido a la diferencia de calidad de las imágenes, ya que las suyas están obtenidas por satélite y las mías con telescopio. Significa, por lo tanto, que los datos calculados y su evolución son correctos, aunque con menor detalle.

Seguidamente calcularé la desviación de mis resultados respecto a los de SW. Para ello he hecho una tabla con los números de Wolf de SW y los que he obtenido yo, y he calculado el error absoluto y el relativo de cada valor y de la pendiente:

	Promedio	Space Weather	Error absoluto	Error relativo	Error relativo %						
07/01/2014	97	245	148	0,60	60,41	05/07/2014	114	199	85	0,43	42,71
28/01/2014	59	62	3	0,05	4,84	10/07/2014	105	183	78	0,43	42,62
29/01/2014	69	70	1	0,01	1,43	17/07/2014	12	11	1	0,09	9,09
12/02/2014	85	151	66	0,44	43,71	31/07/2014	65	145	80	0,55	55,17
20/02/2014	85	123	38	0,31	30,89	12/08/2014	51	82	31	0,38	37,80
25/02/2014	97	205	108	0,53	52,68	18/08/2014	75	121	46	0,38	38,02
07/03/2014	79	174	95	0,55	54,60	27/09/2014	99	203	104	0,51	51,23
14/03/2014	57	130	73	0,56	56,15	23/10/2014	95	123	28	0,23	22,76
17/03/2014	39	139	100	0,72	71,94	28/10/2014	44	120	76	0,63	63,33
05/04/2014	82	174	92	0,53	52,87	13/11/2014	52	89	37	0,42	41,57
09/04/2014	57	94	37	0,39	39,36	20/11/2014	65	72	7	0,10	9,72
16/04/2014	89	149	60	0,40	40,27	23/12/2014	55	113	58	0,51	51,33
09/05/2014	59	124	65	0,52	52,42	17/01/2015	26	75	49	0,65	65,33
14/05/2014	75	138	63	0,46	45,65	22/01/2015	36	50	14	0,28	28,00
18/05/2014	46	146	100	0,68	68,49	09/02/2015	49	94	45	0,48	47,87
21/05/2014	55	126	71	0,56	56,35	20/02/2015	45	86	41	0,48	47,67
05/06/2014	37	70	33	0,47	47,14	27/05/2015	23	46	23	0,50	50,00
07/06/2014	72	132	60	0,45	45,45	17/06/2015	53	87	34	0,39	39,08
19/06/2014	55	108	53	0,49	49,07	Media			56,55	0,44	44,24
27/06/2014	26	72	46	0,64	63,89	Línea de tendencia	-0,0729	-0,1616	0,0887	0,55	54,89

Tabla 4: Cálculo de errores entre mis resultados y los de Space Weather

El error absoluto y el error relativo los he calculado aplicando la fórmula en el Excel, pero a continuación explicaré detalladamente el proceso de la primera medición :

$$Error_{absoluto} (\epsilon_A) = |Valor_{experimental} - Valor_{real}| = |97 - 245| = 148$$

En este caso se ha dado la casualidad que el error absoluto es bastante elevado, pero si observamos la tabla de errores vemos que en general no es así, ya que el error absoluto medio es 56,55.

Para calcular el error relativo en tanto por ciento de la primera medición:

$$Error_{relativo} (\epsilon_R) = \left| \frac{Valor_{experimental} - Valor_{real}}{Valor_{real}} \right| \cdot 100 = \frac{148}{245} \cdot 100 = 60,41\%$$

Por lo tanto, en la primera medición hay un 60,41% de error. En este caso es bastante grande, debido a que el valor real de esta primera medición es muy elevado, y por lo tanto es normal que haya bastante error, pero el error relativo medio es de 44,24%.

Finalmente calculamos el error de la pendiente de la línea de tendencia:

$$\epsilon_A = |-0,0729 - (-0,1616)| = 0,0887$$

Y su error relativo:

$$\epsilon_R = \left| \frac{0,0887}{-0,1616} \right| \cdot 100 = 54,89\%$$

En la línea de tendencia hay un 54,89% de error relativo, cifra bastante elevada, debida a la diferencia de calidad de las imágenes. A pesar de obtener bastante error en cada valor, las dos figuras son muy similares, y podemos intuir que los resultados obtenidos nos indican con bastante precisión la variación de actividad solar.

## 6. Posición de las manchas solares

Del mismo modo que el número de manchas varía a lo largo de un ciclo solar, la posición de las mismas sigue también un patrón.

Para determinar la posición de un punto en la superficie solar se utilizan habitualmente las **coordenadas heliográficas**. Éstas, al igual que en la Tierra, vienen determinadas por dos parámetros: la latitud (desde el ecuador hacia los polos, desde  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$  a lo largo de los paralelos) y la longitud (desde el meridiano estándar<sup>23</sup>, de  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$  a este y oeste). No obstante, a diferencia de la Tierra, un punto de la superficie solar va cambiando de coordenadas debido a cuatro factores:

- La rotación solar: el Sol no es un cuerpo sólido, y por lo tanto las coordenadas heliográficas no rotan con él, son fijas en la imagen
- La inclinación del eje de rotación de la Tierra en función del plano de la eclíptica ( $23,4^\circ$ ) apuntando a la estrella polar
- La inclinación del eje de rotación del Sol en función del plano de la eclíptica ( $7,25^\circ$ ) apuntando hacia la constelación de Cefeo
- Las diferentes distancias entre el Sol y la Tierra debido a la órbita elíptica de la Tierra

Si el eje de rotación de los dos astros fuera perpendicular al plano de la eclíptica, veríamos el Sol sin inclinación, pero debido al ángulo de los dos ejes de rotación, ésta varía cada día (imagen 12).

Disponemos de plantillas para corregir esta inclinación y determinar las coordenadas reales de una mancha. Con ello conseguimos homogeneizar las imágenes que vemos del Sol en función del día del año en que están tomadas. Estas plantillas dependen de la latitud heliográfica del centro del disco solar del día correspondiente ( $B_0$ ), que puede variar desde  $-7,25^\circ$  hasta  $+7,25^\circ$ , y que refleja la latitud heliográfica del ecuador solar

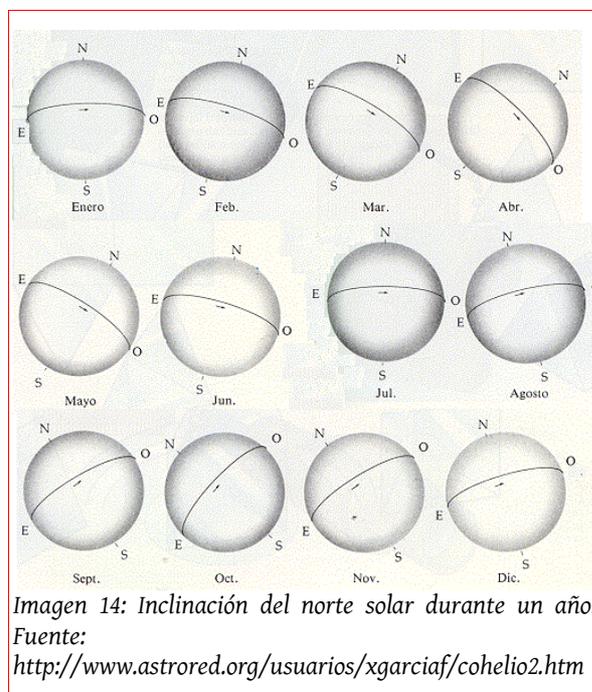


Imagen 14: Inclinación del norte solar durante un año.  
Fuente:  
<http://www.astrored.org/usuarios/xgarciaf/cohelio2.htm>

<sup>23</sup>Por convenio, el meridiano que cruzó el centro del disco el 1 de enero de 1854 a las 12h, propuesto por Richard Carrington

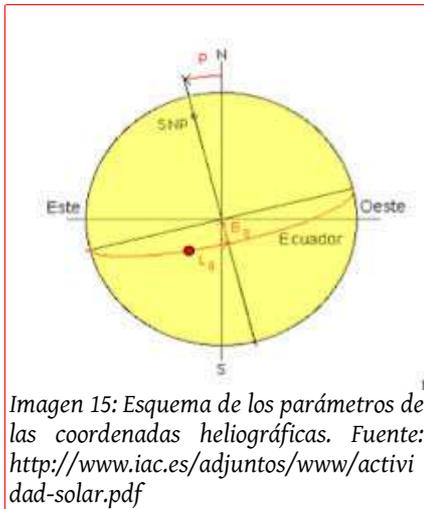


Imagen 15: Esquema de los parámetros de las coordenadas heliográficas. Fuente: <http://www.iac.es/adjuntos/www/actividad-solar.pdf>

respecto a la imagen. Existen 15 plantillas distintas (desde  $-7^\circ$  a  $+7^\circ$ ) y para cada día se escoge la plantilla con el  $B_0$  más similar y se aplica sobre las imágenes que tenemos del Sol.

El  $B_0$  de cada imagen se calcula adoptando como referencia el día 1/01/2011 y con la siguiente fórmula:

$$B_0 = -7,25 \cos\left(\frac{(\Delta\text{días} - 64,25)360\pi}{365 \cdot 180}\right)$$

La máxima inclinación del ecuador del Sol respecto al disco solar es  $7,25^\circ$ , y con esta fórmula se relaciona ésta con los días que han transcurrido desde el 1/01/2011 para calcular la inclinación del día en cuestión.

Incorporando esta fórmula en un Excel he calculado la plantilla correspondiente a los días de los que tengo imágenes, y utilizando el Photoshop las he aplicado a las mismas. En la web <http://www.astrogirona.com/projectes2/> se pueden consultar las 38 imágenes con la plantilla correspondiente:

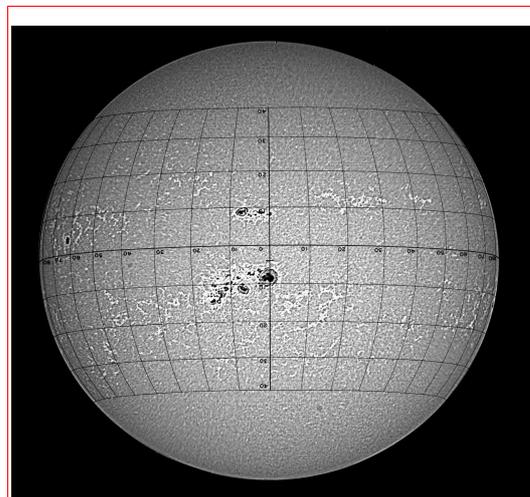
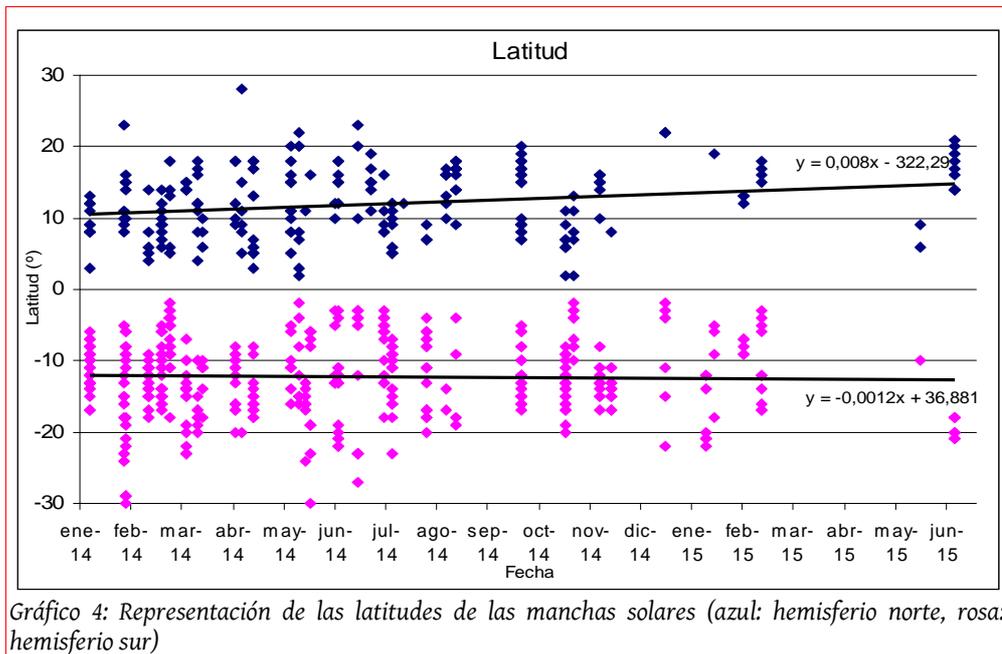
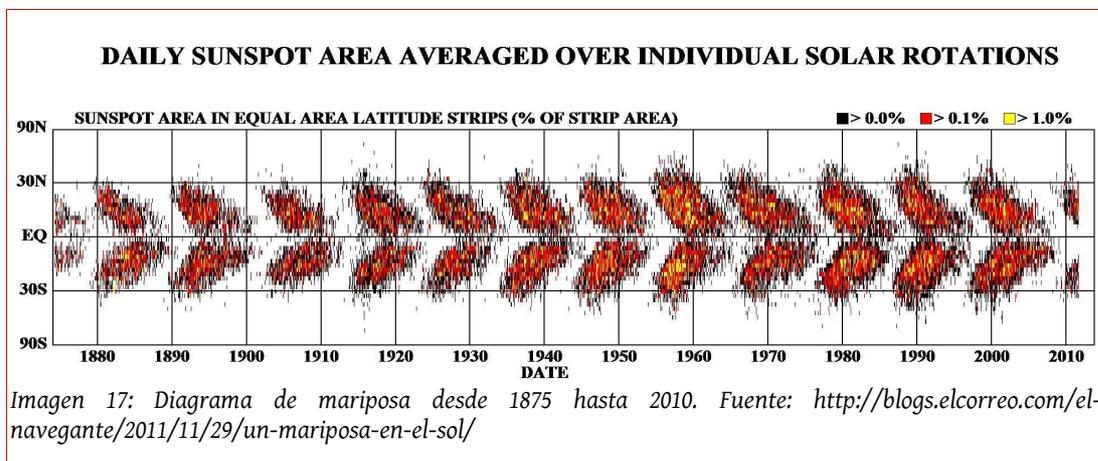


Imagen 16: Imagen del día 07/01/14 con la plantilla de  $-4^\circ$  incorporada

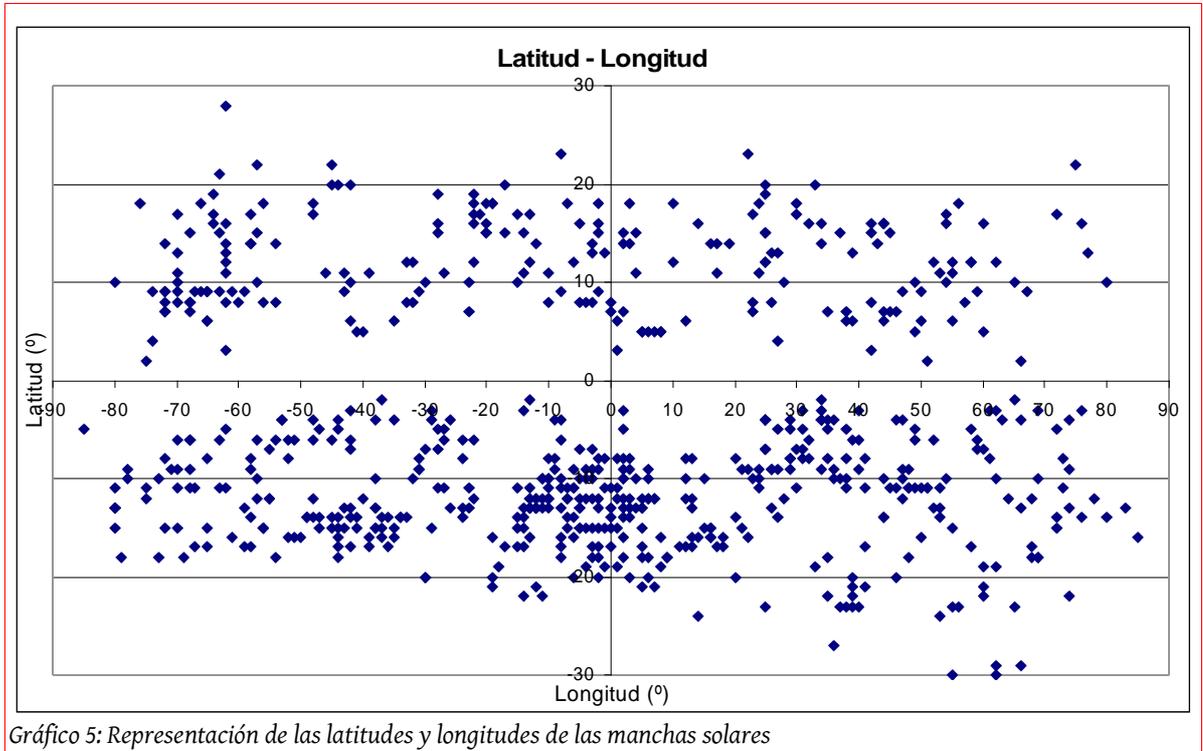
Seguidamente he anotado en un Excel la latitud y la longitud de las 668 manchas detectadas, obteniendo el siguiente gráfico:



A medida que avanza el ciclo solar las manchas se aproximan al ecuador, pasando de 30°-40° al principio del ciclo (2008) a 5°-10° al final del ciclo, sin traspasar nunca el ecuador. Con los resultados obtenidos no podría argumentar esta afirmación, ya que ambas líneas de tendencia se alejan del ecuador (aunque las dos con una pendiente casi despreciable). Esto se debe a que no dispongo de observaciones de todos los días y además, el período de observación es corto (1 año y medio), por lo tanto es normal que no se vea claramente. Lo que sí se puede afirmar visualizando el gráfico es que las manchas no llegan nunca al ecuador ni superan los 40° N o S. También vemos que el hemisferio sur es bastante más activo que el norte (451 manchas respecto 217). Si hiciéramos el seguimiento de la latitud durante varios ciclos, el resultado sería un **diagrama de mariposa**: como el siguiente:



Si representamos todas las manchas con las dos coordenadas obtenemos el siguiente gráfico, en el cual vemos las zonas del Sol más activas (en base a las imágenes analizadas):



Si tuviéramos imágenes de todos los días del año tendríamos una radiografía más exacta.

## 7. Cálculo de la rotación solar

Las manchas se mueven acorde a la rotación del Sol, ya que normalmente no tienen movimiento propio, así que a partir de su posición podemos calcular el período de rotación solar. Este método fue utilizado por Galileo Galilei en 1608 para deducir el tiempo que tarda el Sol en rotar sobre su eje.

En la descripción teórica, vimos que el Sol no tarda el mismo tiempo en dar la vuelta en todas sus partes (unos 25 días en el ecuador y más de 30 en los polos<sup>24</sup>). Aún así, la gran mayoría de las manchas se encuentran muy cerca del ecuador (entre 5° y 30°), por lo tanto, su rotación debería ser aproximadamente de 25 días.

La Tierra gira alrededor del Sol en el mismo sentido que éste gira sobre su eje. Como consecuencia, cuando un punto de la superficie del Sol haya girado 360°, la Tierra habrá avanzado en su órbita, por lo tanto el Sol tendrá que girar un poco más para que nosotros observemos el período completo. Esto hace que existan dos periodos distintos: el **período sinódico** ( $S$ ), que es el aparente desde la Tierra, y el **período sideral** ( $P$ ), que es el real. El sinódico es ligeramente superior al sideral. En primer lugar calcularé  $S$  y después  $P$ .

Para calcular la rotación del Sol se debe visualizar la evolución de una misma mancha, y por ello utilizaré dos imágenes. Durante los días 28/01/14 y 29/01/14 hay un grupo de manchas del cual se observa su evolución, y esto también pasa entre el 14/03/14 y el 17/03/14. Escojo para el cálculo esta segunda opción ya que al haber transcurrido tres días en vez de uno, habrá menos incertidumbre.

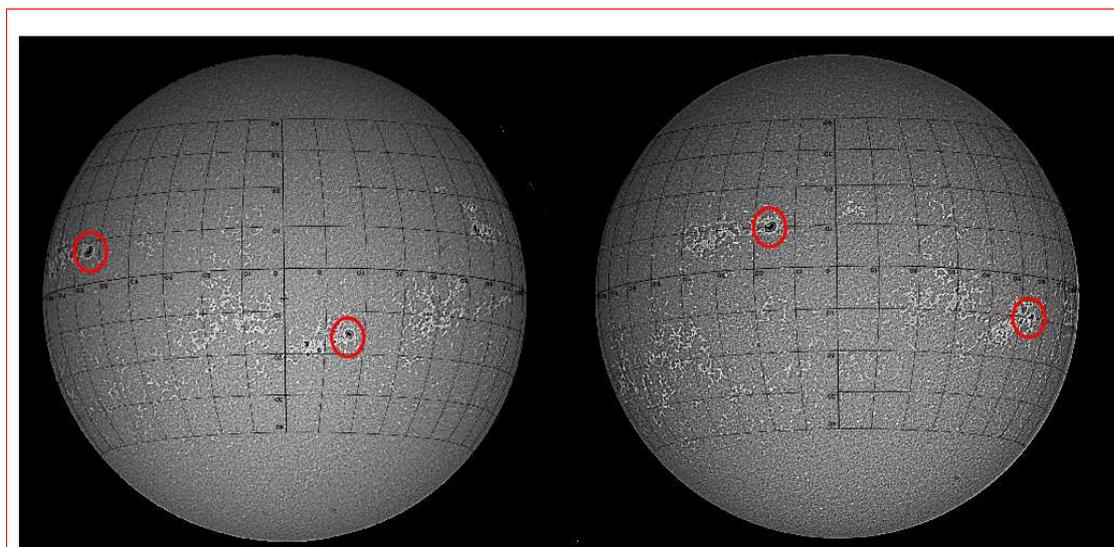


Imagen 18: Identificación de una misma mancha en las dos imágenes. Izquierda: imagen del Sol del día 14/03/14. Derecha: imagen del Sol del día 17/03/14. Fuente: propia

<sup>24</sup>Dato tabulado. Fuente: <http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/sol tierra/2.htm>

Para calcular el período de rotación del Sol (T) necesito conocer su velocidad angular ( $\omega$ ), así que aplicaré las fórmulas del MCU<sup>25</sup>:

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

( $\Delta\varphi$  es el desplazamiento en grados de la mancha)

Sabemos que:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \frac{360}{T}$$

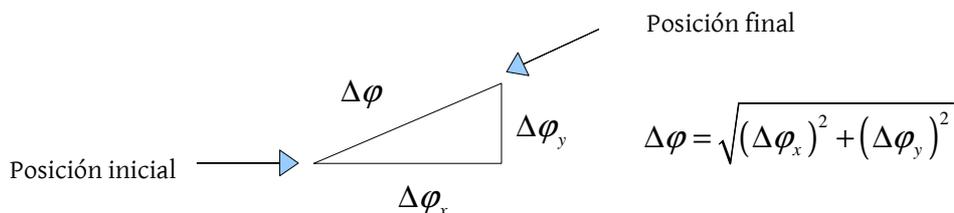
Iguamos las dos ecuaciones:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{360^\circ}{T}$$

y aislamos el período:

$$T = S = \frac{360 \cdot \Delta t}{\Delta\varphi}$$

Aún así,  $\Delta\varphi$  está compuesto por la proyección de  $\Delta\varphi$  en dos planos (oxy y yoz):  $\Delta\varphi_x$  y  $\Delta\varphi_y$ . Si consideramos que los desplazamientos angulares son prácticamente lineales (al considerar  $\Delta t$  pequeño):



Y finalmente:

$$S = \frac{360 \cdot \Delta t}{\sqrt{(\Delta\varphi_x)^2 + (\Delta\varphi_y)^2}}$$

Vamos a calcular su incertidumbre, substituyendo al final para no perder decimales:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\cancel{\Delta 360}}{\cancel{360^\circ}} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} + \frac{\Delta(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi}$$

<sup>25</sup>MCU: Movimiento circular uniforme

donde:

$$\frac{\Delta(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi} = \frac{\Delta((\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2)^{1/2})}{(\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2)^{1/2}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta(\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2)}{\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta(\Delta\varphi_x^2) + \Delta(\Delta\varphi_y^2)}{\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2}$$

Calculamos por separado  $\Delta(\Delta\varphi_x^2)$ . La componente y será análoga:

$$\frac{\Delta(\Delta\varphi_x^2)}{\Delta\varphi_x^2} = 2 \cdot \frac{\Delta(\Delta\varphi_x)}{\Delta\varphi_x} \rightarrow \Delta(\Delta\varphi_x^2) = 2\Delta\varphi_x \Delta(\Delta\varphi_x)$$

Por lo tanto, sustituyendo:

$$\frac{\Delta(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi} = \frac{1}{2} \frac{2\Delta\varphi_x \Delta(\Delta\varphi_x) + 2\Delta\varphi_y \Delta(\Delta\varphi_y)}{\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2} = \frac{\Delta\varphi_x \Delta(\Delta\varphi_x) + \Delta\varphi_y \Delta(\Delta\varphi_y)}{\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2}$$

Finalmente:

$$\Delta S = S \left( \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} + \frac{\Delta\varphi_x \Delta(\Delta\varphi_x) + \Delta\varphi_y \Delta(\Delta\varphi_y)}{\Delta\varphi_x^2 + \Delta\varphi_y^2} \right)$$

**CÁLCULO DE LA ROTACIÓN SOLAR 14/03/14 - 17/03/14.** A continuación calcularé la rotación solar a partir de estas dos imágenes y con la mancha que mejor visualizo:

- Incremento de posición respecto x:  $\Delta\varphi_x = \varphi_{x_f} - \varphi_{x_0} = 55^\circ - 16^\circ = 39^\circ$
- Incremento de posición respecto y:  $\Delta\varphi_y = \varphi_{y_f} - \varphi_{y_0} = -9^\circ - (-16^\circ) = 7^\circ$

La incertidumbre del incremento de posición respecto x y respecto y será la misma (considerando la mínima medida posible):

$$\Delta\Delta\varphi_x = \Delta\varphi_{x_f} + \Delta\varphi_{x_0} = 1^\circ + 1^\circ = 2^\circ$$

El espacio que ha recorrido es positivo ya que se mueve de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba.

La primera imagen se tomó el 14 de marzo a las 13:04 y la segunda el 17 de marzo a las 13:00. Por lo tanto, el incremento de tiempo será de 2 días, 23 horas y 56 minutos, lo que equivale a

$$2 + \frac{23}{24} + \frac{56}{24 \cdot 60} = \frac{2880 + 1380 + 56}{1440} = \frac{4316}{1440} = \frac{1079}{360} \text{ días}$$

Considero que la incertidumbre del tiempo es despreciable ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) ya que está grabado por ordenador y su sensibilidad no es representativa en comparación al incremento del tiempo entre ambos días.

Así pues, la rotación será:

$$S = \frac{360 \cdot \Delta t}{\sqrt{(\Delta \varphi_x)^2 + (\Delta \varphi_y)^2}} = \frac{360 \cdot \frac{1079}{360} \text{ días}}{\left(\sqrt{7^2 + 39^2}\right)^\circ} = 27,23 \text{ días}$$

Y su incertidumbre será:

$$\Delta S = 27,23 \left( \frac{7 \cdot 2 + 39 \cdot 2}{7^2 + 39^2} \right) = 1,60 \text{ días}$$

$$S = (27,23 \pm 1,60) \text{ días}$$

$$\frac{\Delta S}{S} \cdot 100 = \frac{1,60}{27,23} \cdot 100 = 5,88\%$$

$$S = 27,23 \text{ días} \pm 6\%$$

Este período es el sinódico, y dado que la Tierra tarda 365,25 días en dar una vuelta alrededor del Sol, podemos corregirlo calculando el sideral con la siguiente ecuación (ver apéndice 8 para su demostración):

$$P = \frac{S \cdot 365,25}{S + 365,25} = \frac{27,23 \cdot 365,25}{27,23 + 365,25} = 25,34 \text{ días}$$

Consideraré que el período de rotación de la Tierra alrededor del Sol no tiene incertidumbre ya que es un dato tabulado, por lo tanto la incertidumbre de P solo dependerá de S:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta S}{S}$$

$$\Delta P = P \left( 2 \cdot \frac{\Delta S}{S} \right) = 25,34 \left( 2 \cdot \frac{1,60}{27,23} \right) = 2,98 \text{ días}$$

$$P = (25,34 \pm 2,98) \text{ días}$$

$$\frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{2,98}{25,34} \cdot 100 = 11,76\%$$

$$P = 25,34 \text{ días} \pm 12\%$$

Sabiendo que las manchas se encuentran cerca del ecuador y que su rotación es de 25 días, calcularé el error respecto mi resultado:

$$\varepsilon_A = |25,34 - 25| = 0,34$$

$$\varepsilon_R = \left| \frac{0,34}{25} \right| \cdot 100 = 1,36\%$$

Vemos que el error relativo de nuestro resultado respecto al valor tabulado es de solo un 1,36%, con lo que he obtenido un resultado muy exacto. Además, aunque la incertidumbre sea considerable, no es extremadamente grande (un 12%), por lo que es también un resultado bastante preciso teniendo en cuenta las posibles fuentes de error.

## 8. Cálculo del tamaño de las manchas solares

Algunos científicos defienden otros métodos para el cálculo del índice solar en lugar del número de Wolf. Uno de estos sería calcular la superficie del Sol ocupada por las manchas mediante la utilización de unos programas especiales (por ejemplo Sol o Iris).

Yo solo me propongo calcular el área de algunas manchas para poder comparar su tamaño con puntos referenciales conocidos. Dado que hay manchas de todos los tamaños he escogido tres imágenes y he calculado en cada una de ellas una mancha grande, una mediana y una pequeña, para después compararlas.

Primero debemos calcular el **factor escala**. Éste nos indica los kilómetros que equivalen a un centímetro de la imagen, mediante el radio real del Sol y el radio aparente de cada imagen. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Factor escala} (f) = \frac{\text{radio real}(\text{Sol}, \text{km})}{\text{radio aparente}(\text{imagen}, \text{cm})}$$

El radio aparente depende de la imagen, ya que no todas tienen exactamente el mismo tamaño, y se calcula con el Photoshop (opción de regla). Tomando como ejemplo la imagen del 07/01/2014, el factor escala es:

$$f = \frac{695.000\text{km}}{25,86\text{cm}}$$

Se deja en forma de fracción para no perder decimales. Su incertidumbre será:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\cancel{\Delta R_{\text{real}}}}{\cancel{R_{\text{real}}}} + \frac{\Delta R_{\text{aparente}}}{R_{\text{aparente}}} = \frac{0,02}{25,86}$$

Consideramos que el radio real no tiene incertidumbre porque es un dato tabulado, y la incertidumbre del radio aparente considero que es  $\pm 0,02\text{cm}$  porque el Photoshop realiza una resta para calcularlo y su sensibilidad es  $0,01\text{cm}$  (esta incertidumbre será la misma para el diámetro aparente de las manchas).

Más adelante, para calcular la incertidumbre del diámetro real no necesitaré  $\Delta f$ , sino  $\frac{\Delta f}{f}$ . Por lo tanto se deja como lo he expresado antes.

Para calcular el diámetro real de la primera mancha (A1), utilizaré la siguiente fórmula que se puede deducir a partir de factores de conversión:

$$d_{real(km)} = d_{aparente(cm)} \cdot f_{(km \cdot cm^{-1})}$$

$$d_{real1} = 2,14 \cancel{cm} \cdot \frac{695.000km}{25,86 \cancel{cm}} = 57.514km = 5,75 \cdot 10^4 km$$

Como vemos esta mancha tiene un tamaño muy grande (4,5 veces el diámetro de la Tierra), y pertenece a un grupo llamado 1944. Durante las primeras semanas de enero, este grupo provocó entre otros fenómenos auroras boreales, interferencias y tormentas geomagnéticas en la Tierra.

Y finalmente, la incertidumbre absoluta del diámetro de una mancha será:

$$\frac{\Delta d_{real}}{d_{real}} = \frac{\Delta d_{aparente}}{d_{aparente}} + \frac{\Delta f}{f}$$

$$\Delta d_{real} = d_{real} \left( \frac{\Delta d_{aparente}}{d_{aparente}} + \frac{\Delta f}{f} \right)$$

Concretamente de la mancha A1 de esta imagen:

$$\Delta d_{real1} = 5,75 \cdot 10^4 \left( \frac{0,02}{2,14} + \frac{0,02}{25,86} \right) = 581,8km \rightarrow 5,82 \cdot 10^2 km$$

$$d_{real1} = (5,75 \pm 0,06) 10^4 km$$

Y expresado con la incertidumbre relativa:

$$d_{real1} = 5,75 \cdot 10^4 km \pm 1\%$$

Es una incertidumbre muy pequeña, ya que he medido las distancias con el Photoshop y su exactitud es más elevado que manualmente. Aún así no puedo afirmar que el resultado se encuentre dentro del valor real, ya que no he encontrado este dato tabulado.

En la siguiente tabla vemos el cálculo de 3 manchas de cada una de las 3 imágenes escogidas, con sus incertidumbres:

	Radio aparente (cm)	Radio real (km)	Factor escala (km/cm)	Mancha	Diámetro aparente (cm)	Diámetro real (km)		Incertidumbre absoluta (km)	Incertidumbre relativa %
07/01/2014	25,86	695.000	$\frac{695000}{25,86}$	A1	2,14	57.514		$5,75 \cdot 10^4$	1,01%
				A2	1,28	34.401		$3,44 \cdot 10^4$	1,64%
				A3	0,44	11.825		$1,18 \cdot 10^4$	4,62%
10/07/2014	25,09	695.000	$\frac{695000}{25,09}$	B1	1,65	45.705		$4,57 \cdot 10^4$	1,29%
				B2	1,32	36.564		$3,66 \cdot 10^4$	1,59%
				B3	0,48	13.296		$1,33 \cdot 10^4$	4,25%
23/10/2014	25,61	695.000	$\frac{695000}{25,61}$	C1	2,02	54.818		$5,48 \cdot 10^4$	1,07%
				C2	0,74	20.082		$2,01 \cdot 10^4$	2,78%
				C3	0,47	12.755		$1,28 \cdot 10^4$	4,33%

Tabla 5: Tamaño e incertidumbre manchas solares

Teniendo en cuenta que el diámetro medio de la Tierra es de 12.742km, vemos que la mancha A1 es 4,5 veces el tamaño de la Tierra, la C1 es 4,3 veces y la B1 3,5 veces. Las manchas A2 y B2 son casi 3 veces el tamaño de la Tierra, y la C2 1,5 veces. Las manchas A3, B3 y C3 son aproximadamente del mismo tamaño que la Tierra.

Las incertidumbres relativas son todas muy pequeñas (entre 1% y 5%), y cuanto más pequeña es la mancha, mayor incertidumbre relativa tiene, ya que la misma incertidumbre (0,02) se divide por un valor mucho más pequeño.

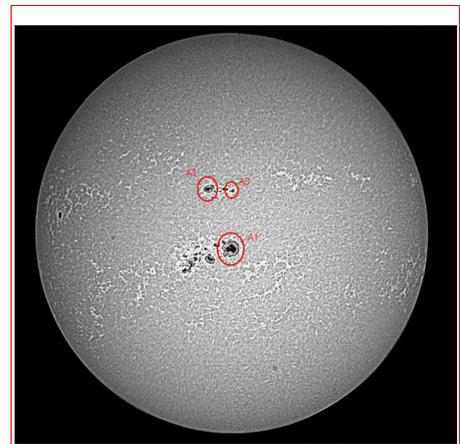


Imagen 19: Sol del día 07/01/14 con las manchas marcadas de las cuales he calculado el tamaño. Fuente: propia

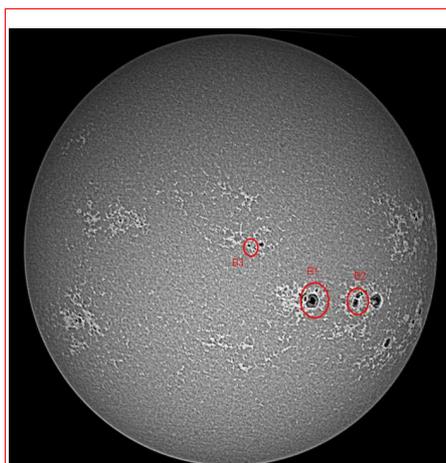


Imagen 20: Sol del día 10/07/14 con las manchas marcadas de las cuales he calculado el tamaño. Fuente: propia

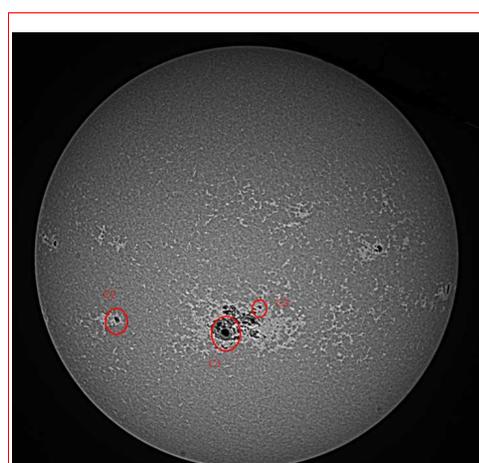


Imagen 21: Sol del día 23/10/14 con las manchas marcadas de las cuales he calculado el tamaño. Fuente: propia

## 9. Conclusiones

Introducirme a través de este trabajo en conceptos de astronomía totalmente desconocidos para mi, ha despertado por un lado más interés personal por este universo tan grandioso y enigmático, y por otro, valorar mucho más el esfuerzo realizado por los investigadores anónimos que con su trabajo diario nos ayudan a entender un poco más nuestro entorno.

He podido comprobar como el uso de nuevas tecnologías aplicadas y complementadas por el trabajo metódico del investigador facilitan la obtención de datos que permiten el estudio de muchos fenómenos y formaciones estelares con más facilidad, hecho que me lleva a aumentar la admiración que siento por aquellas personas que se dedicaban a la investigación antiguamente, sin estos medios, y que a pesar de ello sentaron las bases de la astronomía como ciencia moderna.

He tomado conciencia real de lo insignificantes que somos comparados con la inmensidad del Universo y que cuanto más aprendes sobre él más desconocido resulta. Me he percatado de cuan cambiantes son las teorías sobre el Sol y de lo difícil que es realizar comprobaciones sobre las mismas. He aprendido a utilizar un telescopio y a tratar las imágenes obtenidas mediante programas específicos y a modificar las mismas con técnicas de proceso de imagen, y aunque podía haber utilizado imágenes del Sol captadas directamente de Space Weather, el hecho de experimentar personalmente cada paso realizado me ha permitido comprender y resolver las dificultades con las que te puedes encontrar en un trabajo de investigación.

Afrontar las adversidades que han limitado en algunos días el trabajo que había programado y superar los obstáculos buscando alternativas factibles, me ha permitido experimentar la importancia de ser persistente y evitar el desánimo para avanzar en los proyectos. Los factores meteorológicos (viento, nubes...) y problemas técnicos (averías...), factores fuera de mi control, han sido algunos de los obstáculos que tuve que abordar, y que lentificaron mi estudio.

En relación a las conclusiones referentes a los resultados de los cálculos efectuados destacaría:

- Mediante el cálculo del número de Wolf he comprobado que efectivamente el ciclo de la actividad solar está disminuyendo en la actualidad. Realizar el promedio de las mediciones de los cuatro observadores me ha servido para disminuir el error en el momento de comparar los resultados con los de Space Weather (un 44% en la media de los resultados y un 55% en la pendiente de la línea de tendencia),

atribuyendo el error básicamente a la diferencia de calidad de las imágenes. Sin embargo, el gráfico de ambas fuentes sigue un patrón muy similar, con lo que he cumplido mi objetivo con buenos resultados.

- Del estudio de la posición de las manchas solares se corrobora parte de la información teórica que había detallado: las manchas no se encuentran nunca ni en el ecuador ni en latitudes superiores a  $40^\circ$ . Aún así, pensaba que podría observar parte del diagrama de mariposa, ya que como el número de Wolf, el diagrama podría servir para indicar en qué parte del ciclo nos encontramos. Posibles fuentes de error en la localización de las manchas serían:
  - Puede ser que en el momento de girar las imágenes en comparación a las de Space Weather no lo hiciera con suficiente exactitud
  - Al sobreponer la plantilla a la imagen también puedo haber cometido un pequeño error debido a que el cálculo del  $B_0$  no daba un número exacto (por ejemplo un resultado era  $-5,46^\circ$ ) y por lo tanto se encontraría entre dos plantillas distintas.
  - Indiscutiblemente existe el error humano a la hora de determinar la posición de las manchas, y aunque programas informáticos hubieran reducido este error estoy muy satisfecha de mis resultados.
- A medida que adquiría más conocimientos sobre la estructura solar y el sistema solar, confirmé que el cálculo sobre la rotación del sol no era complicado y he obtenido un resultado muy exacto, con solo un 1,36% de error. Además, con un rango de incertidumbre bastante pequeño (12%) el valor real se encuentra dentro de mis resultados. Esta incertidumbre no se corregiría utilizando imágenes de mejor calidad, únicamente podría reducirse calculando la posición mediante un programa informático.
- El cálculo de la superficie de las manchas solares era un reto para mí puesto que no podía imaginar su tamaño en relación a referencias conocidas. El resultado obtenido con menos de un 5% de incertidumbre no he podido compararlo con el valor real puesto que no he encontrado datos tabulados de estas manchas. Mi sorpresa fue constatar que el tamaño de algunas de las manchas seleccionadas tienen un diámetro hasta cuatro veces superior al de la Tierra. De todas formas soy consciente que hay variables que podrían influir como la curvatura del Sol y el ángulo de visión desde la Tierra. Para evitarlas escogí calcular la superficie de manchas situadas cerca del centro del disco solar.

De las reflexiones expuestas anteriormente puedo afirmar que los resultados obtenidos satisfacen completamente los objetivos que me planteé al inicio del estudio.

A medida que avanzaba en el cálculo y en el tratamiento de las imágenes, me preguntaba sobre otros aspectos a investigar, que podrían ser origen de otros trabajos (estudio de los efectos del campo magnético sobre la Tierra, posibles efectos de la actividad solar sobre el cambio climático...).

La investigación científica está en constante evolución y los trabajos científicos por sencillos que parezcan no podemos darlos nunca por terminados. Por éste motivo me honra que la AAG haya decidido incorporar mi trabajo en su página web (apartado de “recerca”) formando parte del proyecto StarGraph que piensan desarrollar los próximos meses. Ello permitirá la continuidad del trabajo y la ampliación de la recogida de datos de la actividad solar para poder configurar un estudio a más largo plazo y por lo tanto más detallado y con menos error.

Contribuir de esta manera a dar dinamismo al trabajo me satisface personalmente.

## 10. Bibliografía

### 10.1. Páginas web

TRONCOSO, Orlando. Asociación Chilena de Astronomía y Astronáutica. *Manchas Solares*: <http://achaya.cl/radioastronomia/125-manchas> [consulta de 21 de septiembre de 2015]

VENTANAS AL UNIVERSO. Asociación Nacional de Maestros de Ciencias de la Tierra. *Sol*: <http://www.windows2universe.org/sun/atmosphere/sunspots.html&lang=sp> [consulta de 25 de agosto de 2015]

CURIOSEANDO. *¿Qué son las manchas solares?*: <https://curiosoando.com/que-son-las-manchas-solares> [consulta de 30 de agosto de 2015]

DISCOVERY MAX. *El Sol*: <https://www.youtube.com/watch?v=B6mbvexCwVI> [consulta de 5 de septiembre de 2015]

NINE PLANETS. *The Sun*: <http://nineplanets.org/sol.html> [consulta de 27 de agosto de 2015]

*Sunspotter telescope measure sunspots and measure rotation of sun*: <http://gr5.org/sunspotter/> [consulta de 5 de octubre de 2015]

BAA (British Astronomical Association). Solar section. *Stonyhurst Drawings for you to download*: <http://www.britastro.org/solar/index.php?Page=Stonyhurst&style=orig> [consulta de 29 de septiembre de 2015]

PARHELIO. Ruiz Fernández, Javier. García de la Cuesta, Faustino. *Página de observación solar*. <http://www.parhelio.com/> [consulta de 5 de octubre de 2015]

TRUJILLO BUENO, Javier. *Magnetismo Solar: la clave para descifrar los enigmas del Sol*: <http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/solterra/4.htm> [consulta de 7 de septiembre de 2015]

Unitron Italia Instruments. *Coronado – telescopi solari*: <http://www.unitronitalia.com/prodotti.asp?cod=CI&type=020> [consulta de 5 de septiembre de 2015]

DOMÍNGUEZ, Patricio. Observación astronómica. *El Sol en la línea de emisión K del calcio*: <http://www.astrosurf.com/patricio/sol/sol-PSTCaK.htm> [consulta de 27 de agosto de 2015]

CUCKNEY, John. Astronomy. *Coronado CaK PST*: <http://cuckney.pwp.blueyonder.co.uk/astronomy/CoronadoCaK%20PST.htm> [consulta de 27 de agosto de 2015]

PIEKIL, Robert. Astromart. Blog de astronomía y astrofotografía. *The Coronado CaK PST*: [http://www.astromart.com/reviews/article.asp?article\\_id=357](http://www.astromart.com/reviews/article.asp?article_id=357) [consulta de 5 de septiembre de 2015]

WIKIPEDIA, La enciclopedia libre. *Sol*: <https://es.wikipedia.org/wiki/Sol> [consulta de 17 de septiembre de 2015]

WIKIPEDIA, La enciclopedia libre. *Mancha solar*: [https://es.wikipedia.org/wiki/Mancha\\_solar](https://es.wikipedia.org/wiki/Mancha_solar) [consulta de 27 de agosto de 2015]

VIQUIPÈDIA. L'enciclopèdia lliure. *Cicle solar*: [https://ca.wikipedia.org/wiki/Cicle\\_solar](https://ca.wikipedia.org/wiki/Cicle_solar) [consulta de 11 de septiembre de 2015]

F. DÍAZ, Rogrigo. *Estudio de la Actividad Solar*: [http://www.astro.cnba.uba.ar/biblioteca/apunte\\_solar.pdf](http://www.astro.cnba.uba.ar/biblioteca/apunte_solar.pdf) [consulta de 27 de septiembre de 2015]

GEA (Grup d'Estudis Astronòmics). *L'observació diària del Sol*: [http://astrogea.org/divulgacio/sol\\_intro\\_c.htm](http://astrogea.org/divulgacio/sol_intro_c.htm) [consulta de 29 de agosto de 2015]

## **10.2. Libros**

REES, MARTIN. *Universo*. 1a ed., Madrid: Pearson Educación, 2006

CERDÀ, XIMÓ. *El llibre de l'astronomia*. 1a ed., Barcelona: Barcanova, 2011

MARTÍNEZ, VICENT – MIRALLES, JOAN – MARCO, ENRIC – GALADÍ-ENRIQUEZ, DAVID. *Astronomia fonamental*. 2a ed., València: Universitat de València, 2008

RIDPATH, IAN. *Astronomía*. 1a ed., Madrid: Espasa Calpe, 2007

TOLA, JOSÉ – INFIESTA, EVA. Atlas d'astronomia. 1a ed., Barcelona: Parramón, 2001

FRAZIER, KENDRICK. El sistema solar. 1a ed., Barcelona: Planeta, 1986.

SALVAT, MANUEL. El sistema solar. 1a ed., Barcelona: Salvat, 1973

BAKER, JOANNE. 50 cosas que hay que saber sobre el Universo, 1a ed., Barcelona: Ariel, 2011

JORI, CARME – ESTALELLA, ROBERT. L'astronomia a les aules. 1a ed., Barcelona: Universitat de Barcelona, 2008

### **10.3. Descargas en PDF**

[http://www.astronomycameras.com/data/editorials/20110425/assets/first\\_choice\\_for\\_solar\\_imaging.pdf](http://www.astronomycameras.com/data/editorials/20110425/assets/first_choice_for_solar_imaging.pdf)

H. HATHAWAY, David. PDF. *The Solar Cycle*:

<http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2010-1/download/lrsp-2010-1Color.pdf>

Student Manual. *The period of rotation of the Sun*:

[http://www.nce.ufrj.br/ginape/iga502/Material\\_aulas/SolarRotation.pdf](http://www.nce.ufrj.br/ginape/iga502/Material_aulas/SolarRotation.pdf)

El Sol. Heliofísica; *El estudio del Sol*: <http://www.castello.es/archivos/560/Heliofisica.pdf>  
[consulta de 5 de octubre de 2015]

## 11. Apéndices

### 11.1. Apéndice 1. Tipos de estrellas

Las dos clasificaciones más utilizadas en astronomía para agrupar las estrellas según sus características son:

- **Clasificación espectral:** según la temperatura y el color que emiten:

Tipo	Color	Temperatura (°C)
O	Azul	30.000 – 50.000
B	Blanco azulado	12.000 – 30.000
A	Blanco	8.000 – 12.000
F	Blanco amarillo	6.500 – 8.000
G	Amarillo	5.000 – 6.500
K	Naranja	3.500 – 5.000
M	Rojo	2.500 – 3.500

Tabla 6. Clasificación espectral

Cada tipo espectral se divide en 10 subclases, que se enumeran del 0 al 9.

- **Diagrama Hertzsprung – Russell (HR):** Según la masa, tamaño, luminosidad y temperatura:

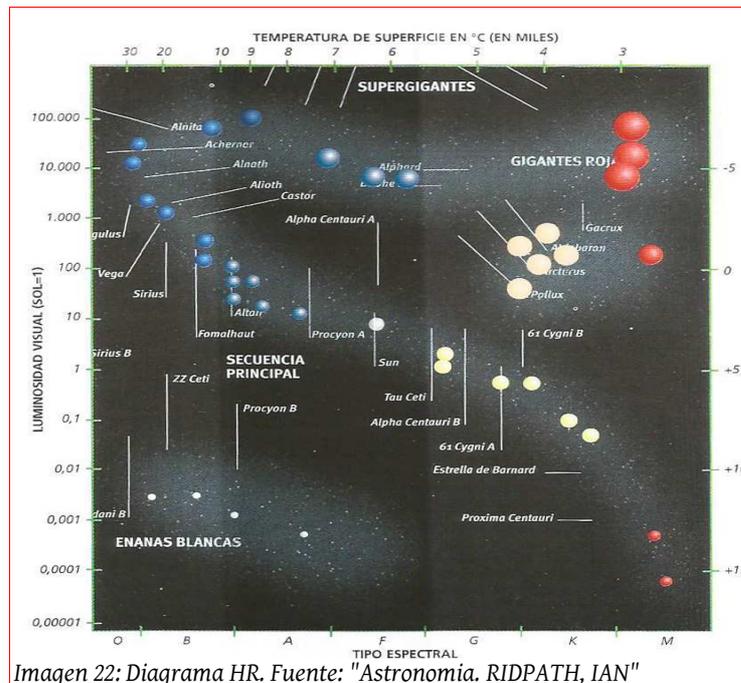


Imagen 22: Diagrama HR. Fuente: "Astronomía. RIDPATH, IAN"

Las estrellas se agrupan en el diagrama de la siguiente forma:

- **Estrellas de la secuencia principal** (tipo V): situadas en la diagonal que va desde arriba a la izquierda (estrellas azules, muy calientes y muy brillantes) hasta abajo a la derecha (estrellas rojas, poco calientes y poco brillantes). El 90% de las estrellas que vemos se localizan en la secuencia principal (entre ellas el Sol). En ella se mantienen estables durante la mayor parte de su vida (la presión de las reacciones nucleares se equilibra con la fuerza de su gravedad) hasta que aumenta su radio y disminuye su temperatura, evolucionando a gigantes rojas o supergigantes.
- **Gigantes rojas** (tipo II): son estrellas de gran tamaño, poco calientes pero muy luminosas. Tienen un ritmo de fusión muy rápido (solo viven unos millones de años) y acaban convertidas en supergigantes o supernovas, y finalmente en estrellas de neutrones o agujeros negros.
- **Enanas blancas** (tipo VI): son estrellas pequeñas, muy calientes pero poco luminosas. Se van apagando y enfriando lentamente (viven cientos de miles de millones de años) y acaban convertidas en una enanas negras.
- **Estrellas cefeidas:** estrellas de diferentes colores y tamaños y luminosidad variable.

### 11.2. **Apéndice 2. Ciclo de vida del Sol**

Las estrellas, igual que los seres vivos y a diferencia de lo que se creía antes, nacen, evolucionan y mueren. Para el estudio de una estrella es importante conocer qué parte del ciclo está viviendo actualmente, ya que se comportan de manera totalmente distinta en cada fase. También es importante tener en cuenta qué tipo de estrella se trata (pequeña, mediana o grande) ya que su evolución y muerte es diferente.

Nos centraremos en la vida del Sol, aunque este proceso es el mismo para cualquier estrella de su clase:

- **Formación:** la teoría más ampliamente aceptada es la **teoría de la nebulosa primitiva**, propuesta por Kant y Laplace<sup>26</sup>, que describe un origen común de los astros del Sistema Solar. Según ésta, el origen del Sol y por lo tanto del Sistema Solar se produjo a partir una nube de polvo y gas interestelar procedente de una supernova (una estrella de masa elevada que explotó). Debido a la fuerza de la gravedad se empezó a condensar y a contraer (*self gravity*). Unos 100.000 años después se transformó en un disco de acreción (material que gira en torno a un objeto central masivo) y el núcleo aumentó su densidad y temperatura, ya que el material colapsaba en él. Este núcleo, llamado protosol, fue el precursor del Sol. Los elementos se fueron dispersando según las fuerzas físicas (los

---

<sup>26</sup>Immanuel Kant (Prusia, 1724 – 1804) y Pierre-Simon Laplace (Francia, 1749 – 1827), formularon la teoría en 1796

rocosos cerca del Sol y los gaseosos lejos). Durante millones de años, debido a los choques entre el polvo y las rocas se condensó materia en diferentes puntos, formando planetesimales. Éstos se unieron formando los planetas que conocemos actualmente. El protosol seguía condensándose, hasta que la presión y la temperatura fueron tan elevadas (11 millones de grados centígrados) que la fusión nuclear fue posible. En este momento el Sol entró en ignición y es cuando se considera que nació y empezó a emitir energía. Durante su infancia, pero, era menos luminoso y más activo que actualmente (con rayos ultravioletas mil veces superiores, viento solar a 3 millones de km/h...).

- **Evolución:** el Sol se encuentra actualmente en esta fase, en la mitad de su vida (nació hace unos 4.600 millones de años y se calcula que continuará evolucionando unos 5.000 millones más). Evolucionando consumiendo el hidrógeno mediante la fusión nuclear y el resultado de este proceso es la energía que produce y un residuo de helio. El Sol se encuentra, en este momento, en la secuencia principal, al igual que las otras estrellas que, como él, evolucionan consumiendo el hidrógeno. Cuando el helio se agote el Sol saldrá de la secuencia principal y empezará su desaparición.

- **Muerte:** el Sol cada vez necesitará quemar más combustible (hidrógeno) para mantenerse en equilibrio, y aumentará su luminosidad y su temperatura. En unos 1.500 millones de años el clima de la Tierra empezará a cambiar pero la desaparición del Sol empezará unos 3.500 millones de años después, cuando su tamaño sea un 50% más grande que ahora. En aquel momento casi no quedará hidrógeno en su núcleo y por lo tanto las reacciones nucleares empezarán a disminuir. El núcleo se enfriará, su presión bajará y, debido a la fuerza de la gravedad, se hundirá y se contraerá. Como consecuencia la temperatura empezará a aumentar y durante unos 2.000 millones de años el Sol se irá dilatando, convirtiéndose en una gigante roja (100 veces más grande y 500 más brillante que ahora). Ese aumento de la temperatura también dará lugar a la fusión del helio, y como residuo se producirá carbono. Este proceso se repetirá varias veces, dando lugar a una cadena de fusiones. Finalmente, pero, el residuo será hierro, del cual no se puede obtener energía mediante la fusión. Entonces se dilatará de nuevo y explotará, dando lugar a una enana blanca. Ésta se irá consumiendo y evolucionará a una enana negra.

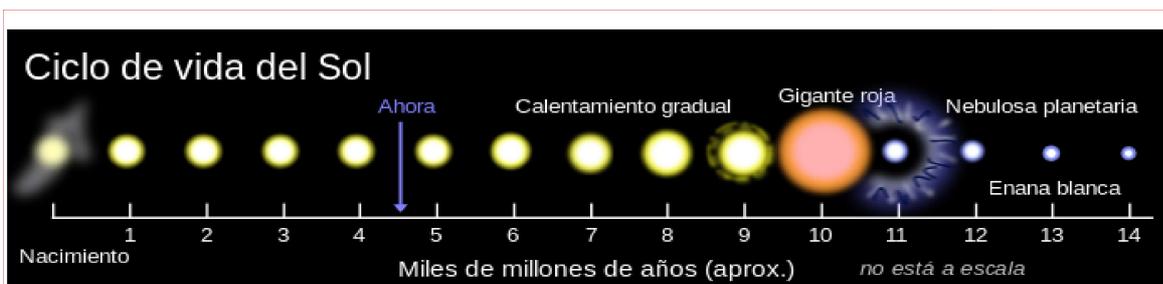


Imagen 23: Ciclo de Vida del Sol. Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Sol>

Por muy contradictorio que sea, el Sol, el que permitió la vida tal y como la conocemos, también la destruirá, abrasando todo lo que tenga alrededor y provocando cambios en toda la heliosfera<sup>27</sup>. Es curioso como la muerte de una estrella destruye, con ella, todo lo que hay a su alrededor, pero a su vez ese polvo interestelar origina un nuevo proceso y vuelve a empezar, formando un bucle infinito, que actualmente no sabemos cuantas veces ya se ha podido reproducir en el Sistema Solar.

### 11.3. Apéndice 3. Estructura del Sol

El Sol se divide en capas concéntricas entre ellas. Cada capa tiene características distintas ya que no tienen la misma finalidad. Las partes en qué se divide el Sol son:

- **Núcleo:** es la parte central del Sol, ocupa un cuarto de su volumen y es también la parte más caliente, a 15 millones °C. La densidad del hidrógeno del núcleo es 160 veces superior a la del agua y la presión 200.000 millones de veces superior a la de la atmósfera de la Tierra. En el núcleo se producen las reacciones termonucleares que generan toda la energía que recibimos del Sol (fusión nuclear), donde se desprenden fotones que circulan a través de las otras capas hasta salir a la superficie. Cada segundo reaccionan 700 millones de toneladas de átomos de hidrógeno, que convierten 5 millones de toneladas de materia en energía.

- **Zona radiante:** es una zona bastante gruesa (0,713 radios solares o 300.000-400.000km), y a medida que nos alejamos del núcleo es un poco más fría. La energía que se desprende del núcleo viaja por esta zona en forma de radiación hacia el exterior. Estas radiaciones aunque se encuentran en todas las longitudes de onda, solo somos capaces de ver la luz visible (380 – 780nm de longitud de onda).

- **Zona convectiva:** la energía atraviesa esta zona mediante convección. Se forman columnas de gas burbujeante que suben y bajan debido a las diferentes densidades. Estas burbujas pueden tener un espesor de 30.000km. Se encuentra a

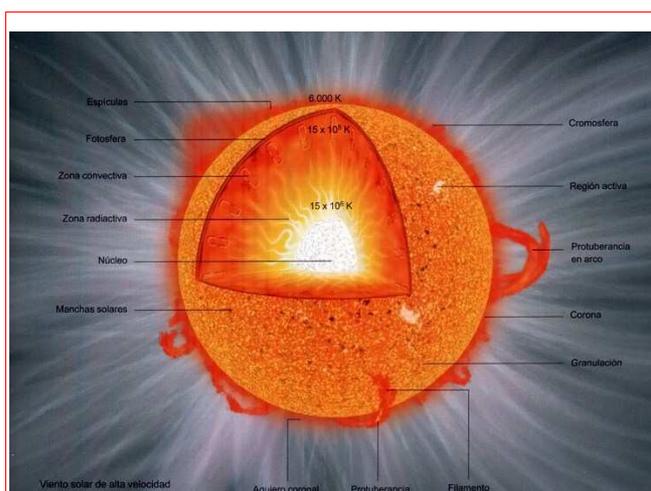


Imagen 24: Estructura del Sol. Fuente: <http://astronomiadab.blogspot.com.es/2010/08/estructura-del-sol.html>

<sup>27</sup>Región espacial bajo la influencia del Sol, más allá de la órbita de Plutón. El límite es la heliopausa

menos temperatura que la zona radiante ya que está más lejos del núcleo.

- **Fotosfera:** es la primera capa que forma parte de la atmósfera solar. Es la superficie visible del Sol, se encuentra a unos 7.000°C en la base y a unos 4.000°C en la parte superior. Se trata de una capa fina (unos 500km de profundidad) y su densidad es suficientemente baja para que la mayoría de los fotones puedan escapar y llegar a la Tierra sin interaccionar con otras partículas. Presenta granulación, burbujas de gas de unos 1.000km de espesor. El gas caliente sube en el centro de cada gránulo a unos 500m/s, y el frío cae a los lados. Los gránulos y supergránulos aparecen y desaparecen cada 10 minutos. Es la capa que contiene las manchas solares que observamos desde la Tierra.

- **Cromosfera:** cuando acaba la fotosfera, la temperatura, en vez de seguir disminuyendo empieza a crecer. Al iniciarse la cromosfera se considera el punto de mínima temperatura (4.000°C). Tiene unos 3.000km de espesor y en la parte superior la temperatura llega a 60.000°C. Este es un aspecto muy curioso, ya que los científicos no saben explicar como la temperatura aumenta al alejarse del núcleo solar, aunque se supone que está relacionado con el campo magnético del Sol. La cromosfera no es visible ya que la fotosfera tiene una luminosidad mucho más elevada, y en consecuencia la cromosfera solo se puede observar durante los eclipses totales de Sol o con filtros de ciertas líneas de absorción, como el Halph.

- **Corona:** cuando la temperatura alcanza 1 o 2 millones grados centígrados, a unos 2.500km sobre la base de la fotosfera empieza la corona, que alcanza una distancia de bastantes radios solares, constituyendo una especie de halo alrededor del Sol. Brilla más o menos como la Luna llena, por lo tanto, igual que la cromosfera solo se observa durante los eclipses totales de Sol o con un coronógrafo, generando eclipses artificiales de Sol. Se extiende más o menos un millón de kilómetros desde la fotosfera, aunque emite un flujo constante de partículas (viento solar) que abarca hasta la heliopausa, situada a millones de km. La heliopausa marca el límite del Sistema Solar, y es donde el viento solar interactúa con el gas interestelar. De esta manera se forma la heliosfera, una burbuja que engloba el Sol y los planetas. Su baja densidad provoca que emita poca radiación y su efecto no se note en la Tierra. Aún así, el Sol es una estrella variable y cuando se encuentra en su máxima actividad la corona se extiende y varía (en este momento si se nota el efecto desde la Tierra).

### 11.4. Apéndice 4. Fusión nuclear

Se unen dos núcleos de hidrógeno (formados por un solo protón) y uno de ellos se convierte en neutrón, formando un núcleo de deuterio o hidrógeno pesado. También se libera un neutrino y un positrón. El núcleo de deuterio se fusiona con un núcleo de hidrógeno, formando un núcleo de helio ligero o helio-3. Esta adición libera energía (fotón de rayos gamma). Dos núcleos de helio ligero se unen, formando un núcleo de helio-4, que es estable. Los núcleos de helio son menos masivos de lo que aparentan (un 0,7% menos), la masa sobrante de los cuales se convierte en energía en forma de fotones. Como consecuencia se liberan dos núcleos de hidrógeno y fotones. La energía se produce por los fotones de rayos gamma y la fuerza motriz de los núcleos de helio-4.

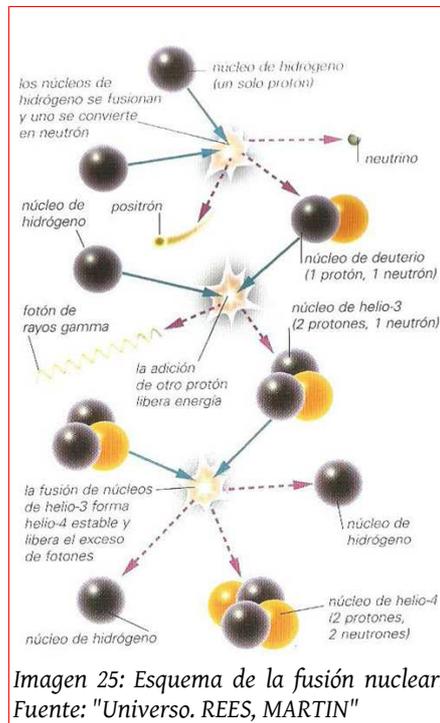


Imagen 25: Esquema de la fusión nuclear. Fuente: "Universo. REES, MARTIN"

### 11.5. Apéndice 5. El telescopio Coronado PST Ca-K

El Coronado PST Ca-K es un telescopio refractor acromático, específico para la observación del Sol. Contiene un filtro Ca-K, el cual permite aislar una capa del Sol (baja cromosfera) ligeramente más fría y por debajo que la que se observa con un Coronado PST H-alpha. Esto hace que se observen los fenómenos antes que con un H-alpha.

El espectro visible del Sol muestra fuertes líneas de absorción (debido a la carencia de fotones). Fraunhofer<sup>28</sup> clasificó líneas espectrales con una nomenclatura especial, y entre ellas se encuentra la línea K, producida por el calcio. Esta es la que el Coronado PST Ca-K procesa, generando imágenes de color azul-violeta debido a la longitud de onda de 393,4nm de la línea.

La cromosfera es visible en distintas longitudes de onda (gran parte por la emisión H-alpha, hidrógeno que se excita y emite luz en un color rojizo). Aún así,

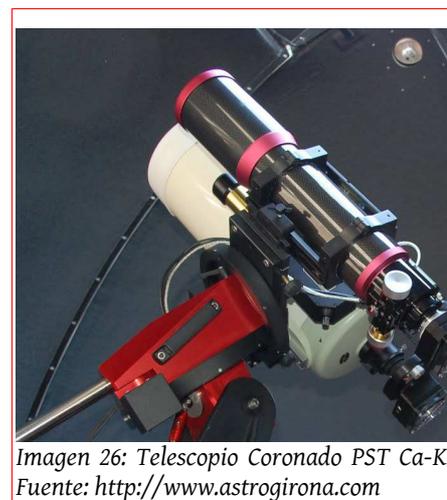
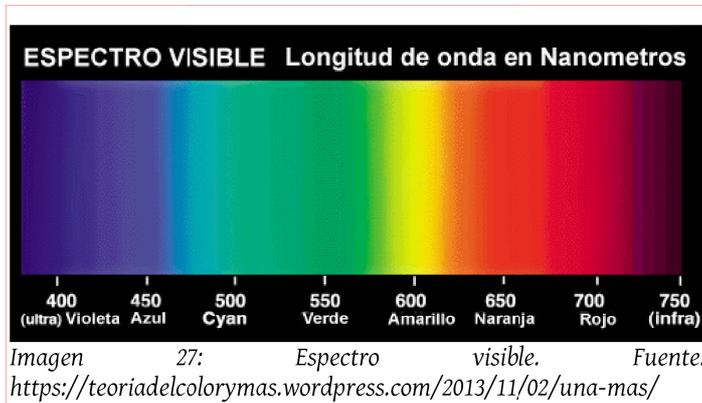


Imagen 26: Telescopio Coronado PST Ca-K. Fuente: <http://www.astrogirona.com>

<sup>28</sup>Joseph von Fraunhofer, 1787 – 1826, astrónomo, óptico y físico alemán

la cromosfera también es visible por el calcio ionizado (Ca II) en la parte violeta del espectro visible en una longitud de onda de 393,4 nm, y se llama línea K de Calcio. Esta luz proviene de átomos de calcio que han perdido un electrón. La mayoría de luz procedente del Sol tiene su origen en el núcleo, ello quiere decir que lleva centenares de miles de años atravesando su interior. Aún así, las emisiones CaK proceden de los niveles superiores, de las regiones magnéticas activas, lo que hace que solo tarden unos minutos en llegar a la Tierra y que sean visibles las playas, supergránulos y manchas con más contraste. A diferencia de las imágenes en H-alpha, y son más difíciles de observar puesto que su longitud de onda lo dificulta. Dado que los átomos de calcio representan tan solo ocho partes por millón de la masa solar y el hidrógeno más del 90%, la emisión en la línea K del calcio es mucho menor, siendo esto el causante que las imágenes sean más débiles.

Dado que el ojo humano no es muy sensible a esta onda que se encuentra en el extremo del espectro de luz visible, algunas personas pueden presentar dificultades a la hora de observar todos los detalles (deterioro por la edad, si la sala no está a oscuras, adaptación del ojo, problemas de vista...), por lo que la principal finalidad del Coronado PST CaK no es la observación visual sino el CCD (dispositivo de carga acoplada) de imágenes, mucho más sensible. Para facilitar el tratamiento he trabajado en blanco y negro.



Apertura	40 mm
Longitud focal	400 mm
F/Radio (abertura)	F/10
Anchura de banda	<2,2 A
Estabilidad térmica	0,005 A/°C
Peso	1,41 kg
Longitud	38,1 cm
Ocular	Kellner, 20 mm (x20)

Tabla 7. Características del telescopio Coronado PST CaK

**11.6. Apéndice 6. Clasificaciones de los grupos de manchas**

En general, los grupos de manchas se clasifican en dos grandes grupos: **unipolares** (una mancha aislada o un grupo compacto de las mismas) y **bipolares** (estructuras elongadas consistentes como mínimo en dos manchas principales que están orientadas más o menos en paralelo a la rotación solar).

Una mancha bien desarrollada pasa por los siguientes tipos: A, B, C, D, E, F, G, H y J. El tipo F es escaso y normalmente las manchas evolucionan pasando del tipo E al G. Muchos grupos sólo llegan a desarrollarse hasta el tipo D y la mayoría se quedan en los estados A, B y C. La duración de un grupo puede ser de unas pocas horas para un poro, a varios meses para los grupos más evolucionados.

A				Unipolar. Poro o pequeño grupo de poros sin penumbra.
B				Bipolar. Grupo mayor de poros sin penumbra y generalmente en formación Este - Oeste.
C				Bipolar. Mancha con penumbra y con un grupo de poros.
D				Bipolar. Dos o más manchas con poros intermedios. Extensión inferior a 10° heliográficos.
E				Bipolar. Grupo con manchas y poros intermedios. Extensión entre 10° y 15° heliográficos.
F				Bipolar. Grupos con manchas y poros intermedios. Manchas extensas y complejas. Extensión superior a 15° heliográficos.
G				Bipolar. Grupo en decadencia con manchas en los extremos sin poros intermedios. Extensión inferior a 10° heliográficos.
H				Unipolar. Mancha con penumbra superior a 2,5° heliográficos.
J				Unipolar. Mancha con penumbra inferior a 2,5° heliográficos.

Imagen 28: Clasificación de Zúrich. Fuente: <http://www.astrosurf.com/obsolar/manual4.html>

**11.7. Apéndice 7. Cálculo del número de Wolf**

	Observador 2			Observador 3			Observador 4		
	g	f	R	g	f	R	g	f	R
07/01/2014	5	48	98	5	47	97	5	49	99
28/01/2014	4	14	54	5	13	63	5	14	64
29/01/2014	5	20	70	5	17	67	5	22	72
12/02/2014	6	26	86	6	26	86	6	24	84
20/02/2014	5	34	84	5	37	87	5	33	83
25/02/2014	6	34	94	6	37	97	6	39	99
07/03/2014	5	24	74	6	24	84	6	25	85
14/03/2014	4	18	58	4	15	55	4	18	58
17/03/2014	3	10	40	3	9	39	3	10	40
05/04/2014	6	22	82	6	21	81	6	21	81
09/04/2014	5	7	57	5	8	58	5	7	57
16/04/2014	6	30	90	6	25	85	7	26	96
09/05/2014	5	18	68	4	15	55	4	17	57
14/05/2014	6	16	76	6	13	73	6	16	76
18/05/2014	4	9	49	4	8	48	4	8	48
21/05/2014	5	11	61	5	10	60	4	11	51
05/06/2014	3	8	38	3	6	36	3	7	37
07/06/2014	5	25	75	5	22	72	5	21	71
19/06/2014	4	13	53	4	11	51	5	15	65

	Observador 2			Observador 3			Observador 4		
	g	f	R	g	f	R	g	f	R
27/06/2014	2	7	27	2	5	25	2	7	27
05/07/2014	9	26	116	9	24	114	9	25	115
10/07/2014	8	27	107	8	26	106	8	30	110
17/07/2014	1	1	11	1	3	13	1	3	13
31/07/2014	5	25	75	4	22	62	4	24	64
12/08/2014	4	11	51	4	11	51	4	13	53
18/08/2014	6	15	75	6	15	75	6	17	77
27/09/2014	6	44	104	5	41	91	6	39	99
23/10/2014	6	40	100	6	33	93	6	35	95
28/10/2014	3	14	44	3	13	43	3	13	43
13/11/2014	4	20	60	3	15	45	4	18	58
20/11/2014	5	14	64	5	12	62	5	22	72
23/12/2014	5	8	58	5	7	57	5	7	57
17/01/2015	2	6	26	2	5	25	2	6	26
22/01/2015	3	5	35	3	7	37	3	6	36
09/02/2015	4	8	48	4	10	50	4	9	49
20/02/2015	3	15	45	3	14	44	3	17	47
27/05/2015	2	3	23	2	3	23	2	3	23
17/06/2015	3	18	48	4	20	60	4	18	58

Tabla 8: Número de Wolf (Observadores 2, 3 y 4)

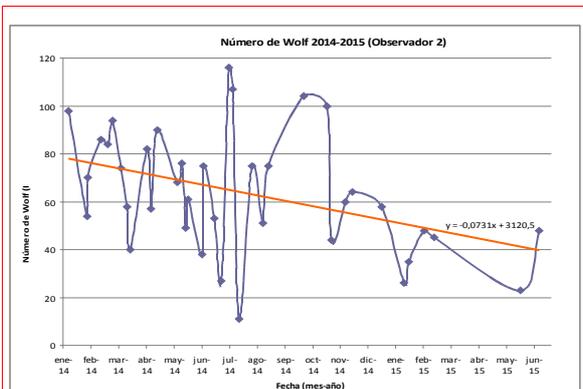


Gráfico 6: Representación del número de Wolf (observ. 2)

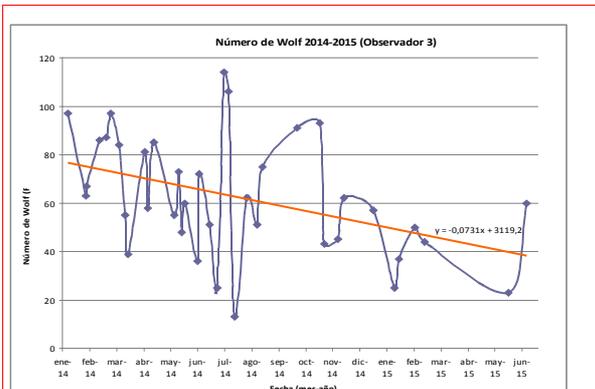


Gráfico 6: Representación del número de Wolf (observ. 3)

Aparte de pequeñas diferencias entre los tres gráficos, vemos que todos siguen la misma figura (igual que la del observador 1). Esto nos indica que todos son un buen índice de la actividad solar. El del observador 4 es el que tiene menos pendiente, el del 2 y el 3 tienen la misma. Aunque el observador 1 tiene la pendiente con más pronunciación, sus resultados son los más bajos. Los del observador 4 son los más altos, y los del observador 2 son también más elevados que los del 1 y del 3.

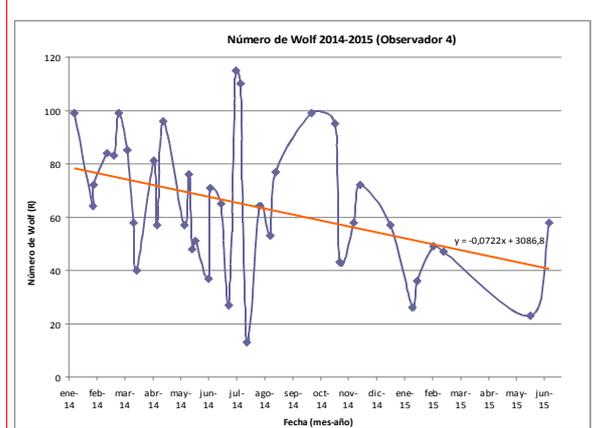


Gráfico 8: Representación del número de Wolf (observ. 4)

Combinando las cuatro observaciones obtenemos los mejores resultados, ya que se compensan los posibles errores de observación.

**11.8. Apéndice 8. Cálculo del período sideral de rotación del Sol**

Como está explicado en el apartado 7 (Cálculo de la rotación solar), el **período sinódico** del Sol (S) es el aparente que observamos des de la Tierra, mientras que el **período sideral** (P) es el real del Sol (con la corrección adecuada para corregir el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol).

Así pues, vamos a buscar la fórmula que los relaciona. Tenemos que calcular P, es decir, el tiempo que tarda la mancha solar a girar los 360°. Experimentalmente pero, encontramos S, el tiempo que tarda la mancha a girar los 360+α°, que es cuando volvemos a ver la mancha alineada con la Tierra.

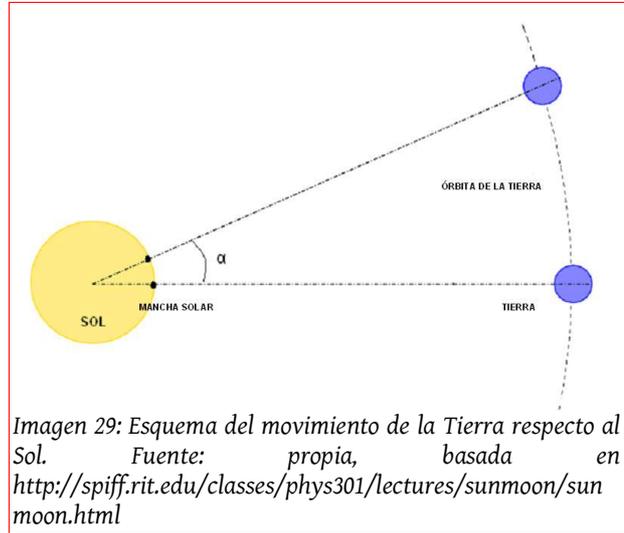


Imagen 29: Esquema del movimiento de la Tierra respecto al Sol. Fuente: propia, basada en <http://spiff.rit.edu/classes/phys301/lectures/sunmoon/sunmoon.html>

Si Δt es el tiempo que tarda esta mancha

en recorrer el ángulo α, podemos afirmar que  $\alpha = \frac{360}{P} \Delta t$ , es decir,  $\Delta t = \frac{\alpha}{360} P$  (1).

De la misma manera, considerando el movimiento de la Tierra alrededor del Sol como un MCU, y sabiendo que una vuelta la completa cada 365,25 días (dato tabulado), tendremos que  $\alpha = \frac{360}{365,25} S$  (2) (ya que la Tierra se ha movido el ángulo α en el tiempo sinódico).

Por lo tanto, sustituyendo la expresión (2) en (1):

$$\Delta t = \frac{\frac{360}{365,25} S}{360} P = \frac{SP}{365,25}$$

Finalmente, observamos que  $P = S - \Delta t$ , por lo que:

$$P = S - \frac{SP}{365,25} \rightarrow P \left(1 + \frac{S}{365,25}\right) = S \rightarrow P = \frac{S}{1 + \frac{S}{365,25}} \rightarrow P = \frac{S}{\frac{365,25 + S}{365,25}}$$

Y llegamos a concluir:

$$P = \frac{365,25 S}{365,25 + S}$$