

# Medición cambios atmosféricos locales durante un eclipse solar

## Autores

Sr. **Miguel Ángel Pío Jiménez**. Astrónomo del Instituto de Astrofísica de Canarias.

Dr. **Miquel Serra-Ricart**. Astrónomo del Instituto de Astrofísica de Canarias.

Sr. **Juan Carlos Casado**. Astrofotógrafo [tierrayestrellas.com](http://tierrayestrellas.com), Barcelona.

Dr. **Lorraine Hanlon**. Astronomer University College Dublin, Ireland.

Dr. **Luciano Nicastro**. Astronomer Istituto Nazionale di Astrofisica, IASF Bologna.

Dr. **Davide Ricci**. Astrónoma del Istituto Nazionale di Astrofisica, IASF Bologna.

## Colaboradores

Dr. **Eliana Palazzi**. Astrónoma del Istituto Nazionale di Astrofisica, IASF Bologna.

Sra. **Emer O Boyle**. University College Dublin, Ireland.

## 1 – Objetivos de la Actividad

Mediante esta actividad aprenderemos a encontrar cambios atmosféricos, sobre todo cambios en la temperatura, debidos a la disminución de la radiación solar producida por la ocultación de la fotosfera del Sol por la Luna. Para ello, se utilizarán una estación meteorológica situada en la banda de

totalidad del eclipse.

Los objetivos que se pretenden alcanzar son los siguientes:

- Conocer y describir la fenomenología básica de los eclipses.
- Conocer y aplicar técnicas de análisis estadístico básico (cálculo de errores).
- Usar la herramienta web de GLORIA para determinar la inercia térmica durante un eclipse total de Sol.

## **2 – Instrumentación**

Para ésta actividad se utilizará una estación meteorológica (Geonica Meteodata 2008CP, ver imagen más abajo) que tiene sensores de temperatura (rango  $-40$  °C a  $+60$  °C y error =  $0.1$  °C) y de radiación solar (piranómetro, rango espectral 305  $-2800$  nm, rango de temperaturas  $-40$  °C a  $+80$  °C, rango  $0-2000$  W/m<sup>2</sup>, error 5 %). Los estudiantes tendrán acceso a los datos en tiempo real o desde una base de datos accesibles posteriormente. Una herramienta web estará disponible para permitir a los estudiantes realizar la actividad.

## **3 – Fenómeno**

### **3.1.- ¿Qué es un eclipse?**

En un eclipse un objeto celeste se oculta debido a la presencia de otro cuerpo. De aquí en adelante consideraremos los eclipses que ocurren en el sistema Sol-Tierra-Luna, donde el término eclipse se aplica a dos fenómenos muy diferentes.

1. Un eclipse solar ocurre cuando la Luna pasa frente al Sol y la Tierra, total o parcialmente, bloquea la luz del Sol. Esto sólo puede ocurrir en Luna Nueva (con la Luna entre el Sol y la Tierra) y si el Sol y la Luna están perfectamente alineados según la línea de visión desde la Tierra. En un eclipse total, el disco del Sol está completamente oculto por la Luna. En eclipses parciales y anulares sólo una parte del Sol se oscurece.

2. Un eclipse lunar ocurre cuando la Luna pasa directamente por la sombra de la Tierra. Esto sólo puede ocurrir cuando el Sol, la Tierra y la Luna se alinean exactamente, o muy cerca, con la Tierra en el centro de los tres. Por lo tanto, un eclipse lunar sólo puede ocurrir una noche de luna llena.

### **3.2.- Condiciones para que ocurra un eclipse**

La mayoría de las veces la Luna se encuentra por encima o por debajo del plano de la eclíptica (es decir, el plano definido por la órbita de la Tierra alrededor del Sol). Para que se produzca un eclipse, la Luna tiene que estar en el plano de la eclíptica, o muy cerca de él, y la Luna en fase de Nueva (eclipse solar) o Luna Llena (eclipse lunar).

Las condiciones en que los eclipses solares pueden ocurrir, pasan dos o tres veces al año – cada 173,31 días – en las denominadas *estaciones de eclipses*. El *año eclipse* es el tiempo entre dos alineaciones del Sol, la Luna y la Tierra y es de 346,62 días. Durante este tiempo, ocurren dos estaciones de eclipses.

Las líneas orbitales nodales de la Luna (Figura 1) no tiene una orientación fija, pero giran alrededor de  $20^\circ$  por año, dando una vuelta completa en 18,6 años. Esto significa que las fechas en que se producen los eclipses cambian cada año. Por ejemplo, los eclipses de 2001 fueron en los meses de enero y febrero, junio y julio, y en diciembre, los eclipses de 2003 se produjeron en mayo y noviembre y los de 2006, en marzo y septiembre. El movimiento de los nodos orbitales significa que los eclipses se producen a lo largo de la eclíptica.

### **3.3.- Número de eclipses por año**

El número mínimo de eclipses que ocurren cada año es cuatro, dos eclipses solares y dos lunares.

El número máximo posible de eclipses por año es siete, y ocurre en muy raras ocasiones. Aquí vemos las posibles

combinaciones para que ocurra:

- 5 eclipses solares y 2 eclipses lunares
- 5 eclipses lunares y 2 eclipses solares
- 4 eclipses solares y 3 eclipses lunares
- 4 eclipses lunares y 3 eclipses solares

### 3.4.- Tipos de eclipses solares

Hay diferentes tipos de eclipse solar, dependiendo principalmente de la longitud de la sombra de la Luna y la distancia de ésta desde la Tierra. Estos se ilustran en la Figura 3.

1) **Eclipse Parcial:** Sólo la sombra penumbral de la Luna alcanza la superficie de la Tierra (véase la Figura 3, la posición C). Estos eclipses siempre ocurren en latitudes altas (norte o sur).

2) **Eclipse Anular:** La Luna está demasiado lejos de la Tierra por lo que su sombra umbral no cubre completamente el disco del Sol, pero aún así bloquea gran parte de la luz solar, dejando solo un anillo de luz visible (Figura 3, posición B).

3) **Eclipse Total:** En éste caso, la Luna está lo suficientemente cerca de la Tierra para que su sombra penumbral alcance la Tierra, bloqueando perfectamente el disco completo del Sol (Figura 3, posición A).

Vale la pena señalar que los eclipses solares son vistos en la Tierra sólo por la feliz coincidencia de que, en algún momento durante el año, los tamaños angulares de la Luna y el Sol son idénticos. Cientos de millones de años en el pasado, la Luna estaba demasiado cerca de la Tierra como para cubrir de forma precisa el Sol tal como ahora podemos observar. Las fuerzas de marea causan en la órbita de la Luna alrededor de la Tierra un

aumento de alrededor de 3,8 cm cada año, y en poco menos de 1,4 mil millones años, la distancia entre la Tierra y la Luna se habrá incrementado en 23.500 kilómetros. Después de eso, la Luna ya no cubrirá por completo el disco solar nunca más, visto desde la Tierra. Por lo tanto, el último eclipse total de Sol en la Tierra se producirá en alrededor unos 1,4 mil millones de años!

### **3.5.- Secuencia de los eclipses**

**Eclipse Parcial:** Durante un eclipse parcial, hay dos puntos de contacto. El primer punto es el momento de contacto entre los discos del Sol y de la Luna, que marca el comienzo del fenómeno. A medida que la Luna continúa a lo largo de su órbita, una fracción creciente del disco solar está cubierto, hasta el máximo, tras lo cual la sombra se aleja de la superficie terrestre y el disco completo es visible de nuevo. La “magnitud” de un eclipse es la fracción del diámetro solar ocultado por la Luna (Figura 4). La magnitud puede ser expresada tanto en porcentaje como fracción decimal (60% o 0,60). El término “oscurecimiento” se refiere a la fracción de la superficie solar cubierta por la Luna (Figura 4).

**MUY IMPORTANTE, SEGURIDAD DE LOS OJOS:** En un eclipse parcial, el Sol sigue siendo muy brillante, así que se aplican las precauciones normales para la observación del Sol también en este caso.

**Eclipse Anular:** Un observador de un eclipse anular verá cuatro momentos de contacto entre los discos solar y lunar. El primer contacto es el momento en que ambos discos parecen tocarse. Poco a poco, en un proceso que dura alrededor de una hora y 30 minutos, el disco lunar comienza a cubrir la totalidad de la superficie solar; este es el segundo contacto. A continuación, la fase central o anularidad, culmina en el inicio del tercer contacto del evento. Esta fase, puede alcanzar alrededor de 12 minutos y 30 segundos. El cuarto contacto se refiere al final de la eclipse.

**Eclipse Total:** Un eclipse total también tiene cuatro contactos. El primer contacto y la etapa anterior son similares a los de un eclipse anular. Pero ahora, antes de el segundo contacto, el observador verá un cambio dramático en la luz. Los parámetros atmosféricos tales como la temperatura y la humedad relativa se cambian también.

Si el observador se encuentra en un lugar elevado con una buena vista del paisaje lejano, podrá observar la sombra de la Luna aproximarse por el horizonte occidental a gran velocidad. En el instante del segundo contacto se produce un anillo de diamantes, un brillo que ocurre en el momento en el que el Sol está casi completamente oculto. Pero antes de que la última porción del Sol desaparezca, debido a lo accidentado del terreno del borde del disco lunar, fragmentos luminosos de luz, llamados perlas de Baily (Figura 5) pueden verse. Entonces, de repente la atmósfera exterior del Sol (la corona solar) (Figuras 6) aparece. En unos pocos segundos del principio puede observarse algo de la cromosfera del Sol (gases) como un arco fino de color rojo intenso con protuberancias brillantes. Estos desaparecen rápidamente después de que el avance del disco lunar (Figura 7).

La corona solar (atmósfera exterior de Sun), de un intenso color blanco nacar, muestra estructuras que siguen la disposición del campo magnético del Sol. Normalmente no es visible porque es unas 100.000 veces menos intensa que la luz solar. En el centro está el disco lunar, observando sólo su silueta. La forma y el brillo de la corona dependen del momento donde el Sol está en su ciclo de 11 años. En el máximo solar, la corona tiene simetría radial (Figura 6 arriba), mientras que en su mínimo las plumas coronales son asimétricas (Figura 6 abajo).

### **3.6.- Visibilidad y duración**

Los eclipses totales no son un fenómeno raro como podría pensarse. Sin embargo, debido a que la sombra de la Luna es

estrecha, sólo son visibles en una banda relativamente estrecha de la superficie de la Tierra, y se observan en un punto específico de la superficie, como una ciudad, sólo una vez cada 375 años en promedio. Por tanto, es necesario realizar largos viajes para estar en la banda de totalidad y ser testigo de todo el evento. En promedio, un eclipse total durará unos 3 minutos, siendo la duración más larga posible de hasta 7 minutos y 30 segundos.

#### **4 – Cálculo de la respuesta térmica de la atmósfera a partir de mediciones atmosféricas en un eclipse solar total. Metodología**

Un efecto interesante que se produce durante el transcurso de un eclipse solar -más notable en un eclipse total- es la disminución de la temperatura ambiental debido a la disminución de la radiación solar o luminosidad ambiente (ver Ref. 8). Sin embargo, mientras el mínimo de luminosidad -máxima oscuridad- coincide con el máximo del eclipse, el mínimo enfriamiento se producirá pasado unos minutos que pueden variar entre los **2 a los 20**.

Este retardo de tiempo depende de muchos factores, tales como la hora del día cuando ocurre el eclipse, la presencia de extensiones de agua cercanas -un lago o un océano- o la proximidad a zonas boscosas, pero es fácilmente medible. Deberá medirse, de forma simultánea, la temperatura y la luminosidad ambiental, teniendo en cuenta que si queremos obtener una buena curva alrededor del máximo del eclipse -momento de máxima oscuridad- el muestreo, o toma de datos, deberá estar por debajo de los cinco segundos. La respuesta térmica de la atmósfera -o **inercia térmica atmosférica**- es el intervalo de tiempo -normalmente minutos- entre el mínimo de luz y temperatura (ver figura 10).

La Figura 10 muestra un ejemplo de los datos de radiación solar y de temperatura tomados durante el eclipse anular de 2005, donde el intervalo de medición fue variable, siendo

inicialmente las tomas cada 5 minutos, siguiendo entonces cada minuto y por último, alrededor del punto máximo del eclipse, cada 20 segundos. Esta secuencia de medidas se repitió igual, pero en sentido inverso durante la segunda mitad del eclipse. Este tipo de medida se denomina “muestreo dinámico”.

#### **4.1.- Medidas en la totalidad**

Durante la totalidad astrónomos de GLORIA instalarán una estación meteorológica que periódicamente -cada 5 segundos- guardará los valores para cada una de las variables que se indicaron anteriormente. Se proporcionará una herramientas web ([www.gloria-project.eu/eclipse-meteo/](http://www.gloria-project.eu/eclipse-meteo/)) que permitirá el examen detallado de los datos para cualquier intervalo de tiempo solicitado. Por ejemplo, se podrán seleccionar intervalos de tiempo para momentos distintos del eclipse. Los valores de intensidad de la radiación solar y la temperatura se representarán en un gráfico, junto con los errores en estos valores. El intervalo se podrá cambiar (“zoom”), de modo que se podrán representar datos más detallados en un intervalo de tiempo determinado, para obtener los valores de los mínimos de intensidad de radiación y de temperatura con mayor precisión

Después de seleccionar los datos y realizar las representaciones gráficas, la “inercia térmica atmosférica” se podrá calcular igual que en el apartado anterior.

#### **4.2.- Medida del error**

Cualquier medición de una cantidad física, tales como la temperatura, tiene un error asociado. Cuando el error es pequeño, o la medición no está siendo utilizada para fines científicos, por lo general se omite para mayor simplicidad. Lo ideal es que una medida se dé a la vez de dos formas, uno “aproximado” y un resultado “exacto”. Por “aproximado” los científicos entienden que significa que el valor medido está próximo al valor real (dentro del error) y que el término



“preciso” significa que cuando se repiten las mediciones se puede reproducir el mismo resultado (una vez más, dentro del error).

Hay dos tipos de errores en una medición: error “sistemático” y “aleatorio”. El primero produce sesgos en la medición de una cantidad y cuando se promedian una serie de mediciones por separado, el valor final difiere significativamente del valor real del parámetro que se está midiendo, afectando a la precisión del resultado. Las causas de un error sistemático son numerosas. Por ejemplo, mala calibración del instrumento utilizado para la medición (mal nivel de cero). También pueden ser no constante, pero relacionado con el valor de una cantidad diferente. Por ejemplo, una regla de metal puede cambiar su longitud debido a un cambio de temperatura en la habitación. Los errores sistemáticos pueden ser difíciles de detectar, incluso para los investigadores experimentados, y no se consideran más aquí.

Por otra parte, los errores aleatorios se rigen por las leyes de la estadística. Aunque el tratamiento puede ser muy complejo, la regla básica es que a medida que el número de mediciones de una cantidad aumenta, la incertidumbre en la medición disminuye. Por lo tanto, la precisión de la medición se puede mejorar a través de la medición repetida y la realización de algunos cálculos estadísticos básicos.

Consideremos el caso de un termómetro y la medición de la temperatura atmosférica. Cuando oímos hablar de la temperatura del aire en las noticias de televisión o la leemos en el periódico, no se hace mención sobre el error del valor o incluso si corresponde a una sola medición o es el valor promedio de varios. Dado que suelen darse como valores enteros (por ejemplo, “la temperatura en Madrid hoy fue de 30 ° C”), se supone que la “incertidumbre” sobre la medida es de  $\pm 0,5$  grados. Esto está bien para el uso que hacemos de esta información. Sin embargo, cuando la medición de la temperatura se utiliza para fines industriales o científicos, podrían ser

necesarias medidas mucho más precisas. Por ejemplo, una precisión de 0,1 o incluso 0,001 grados podría ser necesario para controlar la temperatura en cada segundo en un experimento científico. Pero entonces, ¿cómo es el error estimado en cada una de las mediciones, o el de la media de las mediciones de temperatura tomadas, por ejemplo, durante un minuto?

**Medida independiente:** Supongamos que se está utilizando un termómetro digital que muestra la temperatura con dos dígitos decimales (por ejemplo,  $T = 20,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Una “medida” (independiente) de la temperatura de  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  tiene entonces un error de  $\pm 0.01$  grados. Así que la temperatura medida se escribe como  $20,00 \pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que significa que la temperatura real es más probable que se encuentre en el intervalo  $[19,99-20,01] \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Promediando:** Si hacemos muchas mediciones independientes de la temperatura, después podremos aplicar métodos estadísticos para mejorar la precisión de la medición y el error en la medición se reducirá. La regla de oro es que si hacemos  $N$  estimaciones de la temperatura, el error en la temperatura media se reduce según la raíz cuadrada de  $N$  en comparación con la de una sola medición. Por ejemplo, tenemos 5 mediciones de la temperatura de la siguiente forma:  $20,01 \pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20,01 \pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20,02 \pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $19,98 \pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $19,99 \pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . La media de la temperatura es simplemente la suma de todos los valores dividido por 5 (es decir,  $20,002 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). El error en este valor medio es ahora  $0,01 / 5 = 0,004 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, al hacer 5 estimaciones de la temperatura por separado, el error se reduce de  $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $0,004 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y el resultado final se pondrá como  $T = 20,002 \pm 0,004 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Cuando se promedian mediciones con errores aleatorios (o “independientes”), lo que significa que el error en cada medición no está relacionado de ninguna manera a los otros, el error se reduce tal como se comentó anteriormente. El cálculo del error final se realiza utilizando la ley de propagación de

errores” de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores”:

$$\langle \text{Error} \rangle = (\text{err1}^2 + \text{err2}^2 + \dots + \text{errN}^2) / N$$

En la mayoría de los casos, es razonable asumir que los errores son una fracción fija de los valores medidos. Llamemos a esa fracción  $f$ . Entonces podemos simplificar la fórmula de la siguiente manera:

$$f_{\text{nuevo}} = f \cdot N / N = f / N$$

Por ejemplo para  $N = 16$ , el error aleatorio fraccional se reduce en un factor de 4. Tenga en cuenta que esta es una “Regla de Suma y Diferencia”. Esto significa que si la operación se realiza en los datos medidos es una diferencia más que una suma, y los errores se siguen combinando como se muestra en la fórmula  $\langle \text{Error} \rangle$  anterior (es decir, los errores no desaparecen mágicamente si usted está tomando la diferencia de dos cantidades, donde ambos tienen errores asociados, cuando usted obtiene su resultado). Vamos a utilizar este concepto en la actividad.

## 5 – Referencias

**ref1.** SERRA-RICART, M. et al. Eclipses. Tras la sombra de la Luna. Shelios, 2000. Ameno y vistoso libro sin perder rigurosidad, dedicado especialmente a expediciones para observar eclipses totales de Sol.

**ref2.** GIL CHICA, F.J. Teoría de eclipses, ocultaciones y tránsitos. Universidad de Alicante, Murcia, 1996. Tratado sobre la teoría de eclipses y cuerpos ocultantes en general. Se trata de un libro que desarrolla con detalle el aspecto matemático de estos fenómenos, por lo que exige un conocimiento avanzado de las matemáticas.

La bibliografía más amplia sobre el tema se encuentra en inglés :

**ref3.** ESPENAK, F. Fifty Year Canon of Solar Eclipses : 1986-2035. NASA Reference Publication 1178. Sky Publishing Corporation, Cambridge (USA), 1987. Canon o catálogo de referencia realizada por uno de los mejores especialistas, Fred Espenak. Contiene datos y mapas de todos los eclipses solares entre 1986 a 2035 con detalle e información general del periodo 1901-2100.

**ref4.** ESPENAK, F. Fifty Year Canon of Lunar Eclipses : 1986-2035. NASA Reference Publication 1216. Sky Publishing Corporation, Cambridge (USA), 1987. Canon que contiene datos y mapas de todos los eclipses lunares entre 1986 a 2035 con detalle e información general del periodo 1901-2100.

**ref5.** MEEUS, J. Elements of solar eclipses 1951-2200. Willmann-Bell, Inc, Richmond (USA). Contiene los elementos besselianos de los 570 eclipses entre 1951 y 2200, que permiten calcular las circunstancias generales y locales de los mismos. Las fórmulas, de alta de precisión, han sido desarrolladas por el Bureau des Longitudes de París. También existe una versión en datos con los elementos grabados, aunque sin rutina para su empleo, que debe ser programada.

**ref6.** GUILLERMIER, P. y KOUTCHMY, S. Total Eclipses. Springer, 1999. Ciencia, observaciones, mitos y leyendas sobre los eclipses, especialmente los totales de Sol. Un magnífico libro para quien quiera aprender más sobre los eclipses y su observación.

**ref7.** REYNOLDS, M.D. y SWEETSIR, R.A. Observe eclipses. Observe Astronomical League Publications, Washington (USA), 1995. Excelente obra de divulgación y manual de observación, cubriendo todos los aspectos que puede abarcar el aficionado. Se puede adquirir a través de la editorial que publica la revista americana Sky and Telescope, Sky Publishing Corporation.

**ref8.** JAY ANDERSON. Environment Canada. Weather, Volumen 54,

edición 7, páginas 207–215, Julio 1999. Revista especializada en la publicación de artículos científicos centrados en el estudio de la atmósfera y el clima.

Por último destacar las Publicaciones Técnicas de la NASA, que se publican unos dieciocho meses antes de cada eclipse anular o total. Recogen mapas, tablas, predicciones e información general y local sobre las circunstancias del eclipse en cuestión. Para mayor información dirigirse a Fred Espenak, NASA/GSFC, Code 693, Greenbelt, MD 20771 (USA) ó vía e-mail : [espenak@gsfc.nasa.gov](mailto:espenak@gsfc.nasa.gov).