

APPLICATIONS

Estimación de los contactos C_1 y C_4 durante un eclipse solar parcial mediante análisis geométrico de vídeo astronómico

Javier de Elías¹¹Agrupación Astronómica de Madrid, Spain. E-mail: javierdeelias@gmail.com.**Keywords:** Eclipse solar, contactos© Este artículo está protegido bajo una licencia [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)Este artículo adjunta un software accesible en <https://github.com/JCAAC-FAAE>

Resumen

Se presenta un método automatizado para estimar los contactos C_1 y C_4 durante un eclipse solar parcial a partir del análisis geométrico de vídeo astronómico en formato .ser, con timestamps individuales por fotograma. El procedimiento consiste en detectar los bordes de los discos solar y lunar mediante filtrado de bordes, ajustar sus contornos por circunferencias, y calcular la intersección entre ambas figuras. La evolución temporal del ancho de esa intersección permite extrapolar el instante en que desaparece, identificando así el contacto. El método ha sido aplicado al eclipse parcial del 29 de marzo de 2025 observado desde Majadahonda, Madrid, obteniéndose una estimación para el contacto C_1 de las 09 : 48 : 18.461 UTC $\pm$ 2.60 s y para el contacto C_4 de las 11 : 33 : 58.787 UTC $\pm$ 2.0 s. En el caso de C_1 se obtiene coincidencia con las efemérides dentro del rango de indeterminación, mientras que en C_4 se observa un retraso de aproximadamente 20 segundos. El enfoque propuesto es replicable por observadores amateurs con instrumental adecuado y precisión de fracción de segundo.

Abstract

An automated method is presented to estimate contacts C_1 and C_4 during a partial solar eclipse based on the geometric analysis of astronomical video in .ser format, with individual timestamps for each frame. The procedure involves detecting the edges of the solar and lunar discs using edge filtering, fitting their contours with circles, and calculating the intersection between the two shapes. The temporal evolution of the width of this intersection allows extrapolation of the moment it disappears, thus identifying the contact. The method was applied to the partial eclipse of 29 March 2025, observed from Majadahonda, Madrid, yielding an estimated time for contact C_1 of 09 : 48 : 18.461 UTC $\pm$ 2.60 s and for contact C_4 of 11 : 33 : 58.787 UTC $\pm$ 2.0 s. For C_1 , the result matches the ephemerides within the margin of uncertainty, while for C_4 , a delay of approximately 20 seconds is observed. The proposed approach can be used by amateur observers with suitable equipment and subsecond precision.

1. Introducción

La observación de eclipses solares ha sido tradicionalmente una herramienta fundamental para la validación de modelos de mecánica celeste, la mejora de efemérides astronómicas y la investigación de fenómenos solares y lunares [1]. Uno de los aspectos clave en el análisis detallado de un eclipse es la determinación precisa de los contactos, especialmente los primeros y últimos (C_1 y C_4), que marcan el comienzo y el final del fenómeno observable desde un punto determinado de la superficie terrestre. Estas definiciones se basan en la geometría estándar de los eclipses solares, como se recoge en los catálogos de efemérides de Espenak (2006) [2].

En el caso de los eclipses totales, la identificación de estos contactos puede apoyarse en señales visuales

distintivas como las perlas de Baily, la cromosfera o el anillo de diamante, lo que facilita su estimación directa mediante observación o análisis de imágenes. En contraste, los eclipses parciales presentan un reto mayor: la Luna cubre solo una porción del disco solar, y los momentos de primer y último contacto no se acompañan de fenómenos visuales fácilmente identificables. Detectar cuándo comienza o termina la ocultación resulta especialmente difícil si la fracción de disco afectada es muy pequeña, y si además la calidad óptica o las condiciones atmosféricas no son ideales.

A pesar de estas dificultades, los eclipses parciales ofrecen una oportunidad valiosa para la observación desde regiones amplias del planeta y permiten a astrónomos profesionales y amateurs participar en la obtención de datos útiles. Para ello, es fundamental contar con métodos que permitan extraer información precisa a partir de registros digitales, especialmente vídeos con marca temporal por fotograma.

En este trabajo se presenta un enfoque geométrico automatizado para la estimación de los contactos C_1 y C_4 en eclipses parciales, a partir del análisis de vídeos astronómicos grabados en formato `.ser`. Se combinan técnicas de visión por computadora para la detección de bordes y ajuste de circunferencias con análisis temporal de la posición relativa entre los discos solar y lunar. La implementación se ha realizado en Python, aprovechando librerías de código abierto, y los resultados obtenidos se comparan con predicciones teóricas para evaluar su precisión. El método se basa en la geometría de los discos lunar y solar, observados en vídeo, para estimar el instante en que la distancia entre sus centros iguala la suma de sus radios (es decir, cuando hay contacto tangencial). Se implementa el método en Python, utilizando librerías como OpenCV, NumPy y SciPy, y se valida con datos reales.

2. Metodología

2.1. Adquisición de datos

Durante el eclipse parcial de Sol del 29 de marzo de 2025 se llevaron a cabo observaciones con el objetivo específico de registrar los instantes de contacto C_1 y C_4 mediante grabación en vídeo. La adquisición de datos se realizó utilizando un telescopio Schmidt-Cassegrain de 8 pulgadas, modelo Celestron C8, equipado con un filtro solar de densidad neutra tipo ND5, adecuado para la observación segura del Sol en luz visible.

El sistema de captura incluyó una cámara astronómica monocroma ZWO ASI1600MM, conectada a un ordenador portátil que ejecutaba el programa SharpCap, configurado para grabación en modo de 8 bits. El formato elegido fue `.ser`, el cual permite la adquisición de secuencias de imágenes sin compresión y con inclusión de marca temporal individual por fotograma. La tasa de captura fue de aproximadamente 40 fotogramas por segundo.

Se realizaron dos sesiones de grabación: la primera comenzó aproximadamente un minuto antes del instante previsto para el primer contacto (C_1) y tuvo una duración de seis minutos; la segunda se inició cinco minutos antes del último contacto previsto (C_4), también con una duración de seis minutos. Esta planificación permitió cubrir con margen los cinco primeros y cinco últimos minutos del eclipse desde el lugar de observación, con el fin de obtener datos suficientes para una estimación precisa de ambos contactos.

2.2. Formato de grabación en video

El formato `.ser` es ampliamente utilizado en astronomía amateur para la grabación de vídeos astronómicos sin compresión. Fue diseñado originalmente para capturas planetarias y solares, y ofrece varias ventajas frente a otros formatos como AVI o MP4, especialmente en lo que respecta a la preservación de la calidad de imagen y la precisión temporal.

Una de las características más relevantes del formato `.ser` frente a otros formatos de vídeo convencionales es la posibilidad de almacenar una marca temporal precisa e independiente para cada fotograma. Esta funcionalidad es fundamental para aplicaciones científicas que requieren sincronización temporal exacta, como la medición de ocultaciones, tránsitos o contactos en eclipses solares. En formatos como `.avi` o `.mp4`, esta información no está presente o no se almacena con la suficiente precisión para su uso en análisis astronómicos detallados.

Un archivo `.ser` consta de tres secciones principales: un encabezado fijo de 178 bytes que almacena metadatos sobre la observación (resolución de imagen, número de frames, profundidad de bits, tipo de color, etc.), seguido por la secuencia de imágenes en bruto (una tras otra, sin compresión), y finalmente una tabla de marcas temporales que proporciona un timestamp independiente para cada fotograma.

Los timestamps se almacenan como enteros de 64 bits, representando el número de intervalos de 100 nanosegundos transcurridos desde el 1 de enero del año 1 (formato `FILETIME`, utilizado por Windows). Esta estructura permite reconstruir con gran precisión el instante de adquisición de cada imagen.

El formato permite distintos modos de codificación de imagen, incluyendo monocromo y Bayer, con profundidades de 8 o 16 bits por píxel. En este trabajo se empleó el modo monocromo de 8 bits para maximizar la tasa de fotogramas manteniendo una calidad suficiente para el análisis geométrico de los bordes del disco solar y lunar.

En los vídeos capturados, se trabajó un tamaño de imagen de 1760×2320 píxeles, y se capturaron 13187 frames para el comienzo del eclipse y 11348 frames para el fin de eclipse.

2.3. Extracción de datos del archivo

Para acceder a los datos del vídeo se utiliza una clase personalizada (`reader`) que permite interpretar correctamente la estructura interna del archivo `.ser`. En primer lugar, se lee el encabezado, que ocupa los primeros 178 bytes del archivo. Este bloque contiene información fundamental sobre la configuración de captura del vídeo, incluyendo:

- La resolución de cada fotograma (ancho y alto en píxeles),
- La profundidad de bits por canal (8 o 16 bits),
- El número total de frames del vídeo,
- El número de canales por píxel (uno para imágenes en blanco y negro o Bayer, tres para RGB),
- El tipo de codificación de color.

Con estos datos se calcula el tamaño exacto de cada fotograma en bytes. Esta información es necesaria para determinar correctamente la posición de cada imagen dentro del archivo binario y para saber dónde comienza la sección de marcas temporales.

2.4. Extracción de los timestamps

Una vez conocidos el número total de fotogramas (`n_frames`) y el tamaño de cada uno (`frame_size`), se calcula el desplazamiento hasta el bloque de timestamps como:

$$\text{timestamp_start_offset} = 178 + n_{\text{frames}} \times \text{frame_size}$$

A partir de esta posición, el archivo contiene una secuencia de marcas temporales, una por cada frame, cada una codificada como un entero de 64 bits (8 bytes) en formato *little-endian*. Cada valor representa un número de “ticks” de 100 nanosegundos desde el 1 de enero del año 1, siguiendo la convención del tipo `FILETIME` utilizado por sistemas Windows.

Para convertir cada uno de estos valores en un instante UTC real se utiliza la siguiente expresión en Python:

```
dt = datetime(1, 1, 1) + timedelta(seconds=ticks / 10_000_000)
```

Este procedimiento permite asignar a cada imagen del vídeo un timestamp con una resolución de 0.1 microsegundos, lo cual es esencial para realizar una medición temporal precisa del instante de contacto durante el eclipse.

3. Descripción del algoritmo

El algoritmo tiene como objetivo analizar cada imagen del vídeo astronómico para detectar la posición de los discos solar y lunar y calcular, en cada instante, la *profundidad de intersección*, que permitirá determinar el momento exacto del contacto (C_1 o C_4) por extrapolación. A partir de los valores obtenidos para dicha profundidad en función del tiempo, se realiza un ajuste lineal para estimar el instante en que esta se anula, lo que corresponde al contacto tangencial entre ambos discos.

El procesamiento se realiza de manera secuencial sobre los fotogramas del archivo `.ser`, con una dirección temporal que depende del contacto que se desea estudiar:

- En el caso del contacto C_1 , el análisis comienza en el último fotograma del vídeo y avanza hacia atrás en el tiempo.
- En el caso del contacto C_4 , el análisis comienza en el primer fotograma y avanza hacia adelante.

En ambos casos se parte de una geometría donde la profundidad de intersección es máxima dentro del segmento temporal capturado, lo cual permite contar con suficiente información geométrica desde el inicio del análisis.

El algoritmo se compone de las siguientes etapas:

1. Detección de bordes solares.

La imagen se convierte a escala de grises (si no lo está ya), y se aplica el filtro de Canny para detectar los bordes más marcados. Para evitar regiones contaminadas por elementos externos (como manchas solares o marca temporal), se aplica una máscara de exclusión fija allí donde es necesario. Además, se selecciona sólo la mitad izquierda o derecha del campo visual, dependiendo del contacto (izquierda para C_1 , derecha para C_4), de modo que se trabaje con una región donde el limbo solar permanece visible sin estar ocultado por la Luna.

2. Ajuste de la circunferencia solar.

Una vez detectados los puntos de borde solar, se eligen tres puntos bien distribuidos sobre el arco visible: típicamente el primero, el central y el último del conjunto ordenado. A partir de esos tres puntos se calcula una circunferencia única que los contiene. Este método evita depender de zonas parcialmente ocultadas por la Luna. El radio solar se guarda durante los primeros 30 frames para establecer una media de referencia; posteriormente se aplican criterios de estabilidad: si el nuevo radio difiere más de un 10% respecto a la media, el frame es descartado o los puntos se rotan para reintentar el ajuste.

3. Detección del borde lunar.

Una vez determinada la geometría solar, se construye una máscara circular concéntrica pero de radio ligeramente menor, que permite aislar los bordes internos al disco solar. Dentro de esta zona se buscan bordes pertenecientes al limbo lunar, especialmente en la parte superior del fotograma, donde se espera su aparición. Si se detectan al menos tres puntos adecuados, se seleccionan tres bien espaciados (nuevamente el primero, el central y el último) y se ajusta una circunferencia a dichos puntos.

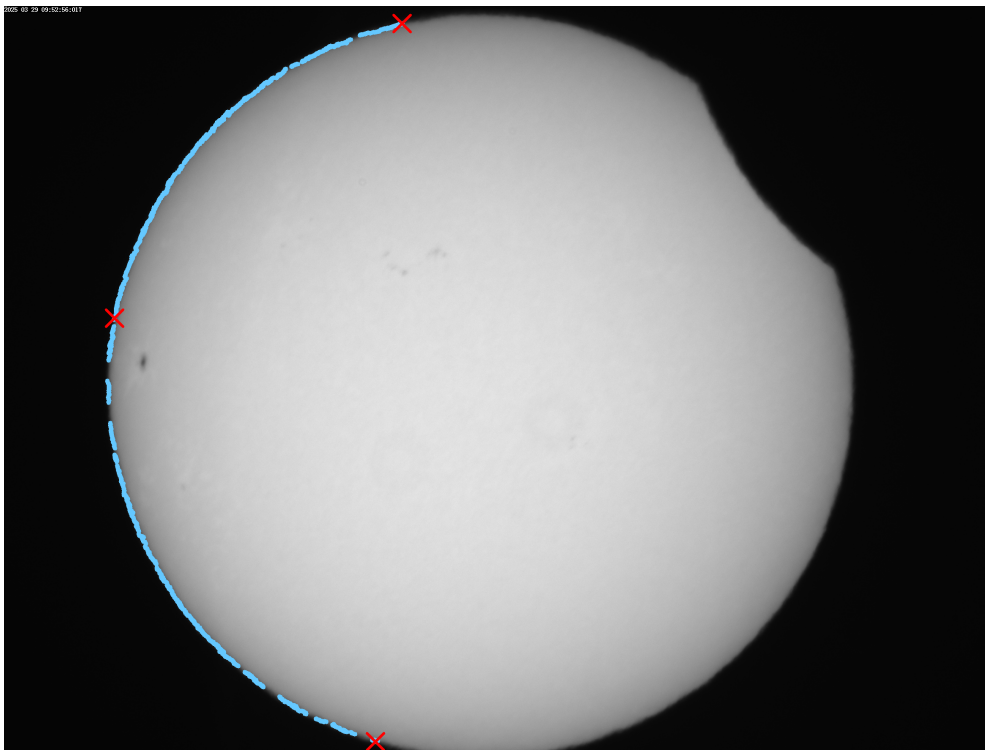


Figura 1. Detección del borde solar (en azul) y determinación de puntos (en rojo). Para la detección del borde se fuerza la mitad izquierda donde no hay eclipse..

4. Ajuste del contorno lunar.

A diferencia del ajuste solar, en el caso de la Luna se fuerza el radio a 1.05 veces el solar previamente calculado, de acuerdo con la estimación de ratio Luna/Sol en eclipse analizado. Este criterio estabiliza el resultado y reduce el error asociado a determinar una circunferencia lunar con puntos muy próximos. El ajuste consiste en encontrar el centro de la circunferencia que mejor se aproxima a pasar por los tres puntos seleccionados, manteniendo fijo el radio.

5. Intersección de discos y cálculo geométrico.

A partir de las circunferencias halladas, se calcula la distancia entre centros y se determina la *profundidad de intersección* como:

$$\text{profundidad_intersección} = R_{\odot} + R_{\text{Luna}} - d_{\text{centros}}$$

Este valor será positivo mientras exista superposición parcial entre los discos, y se anula en el instante del contacto tangencial.

6. Validación y registro.

Si el ajuste de ambos discos y la intersección son válidos, se registran los siguientes parámetros en un archivo CSV: índice de fotograma, timestamp UTC, longitud de la cuerda entre los puntos de intersección, distancia entre centros y la profundidad de intersección. Estos datos permiten posteriormente ajustar una recta a la evolución temporal de la profundidad y estimar por extrapolación el instante de contacto.

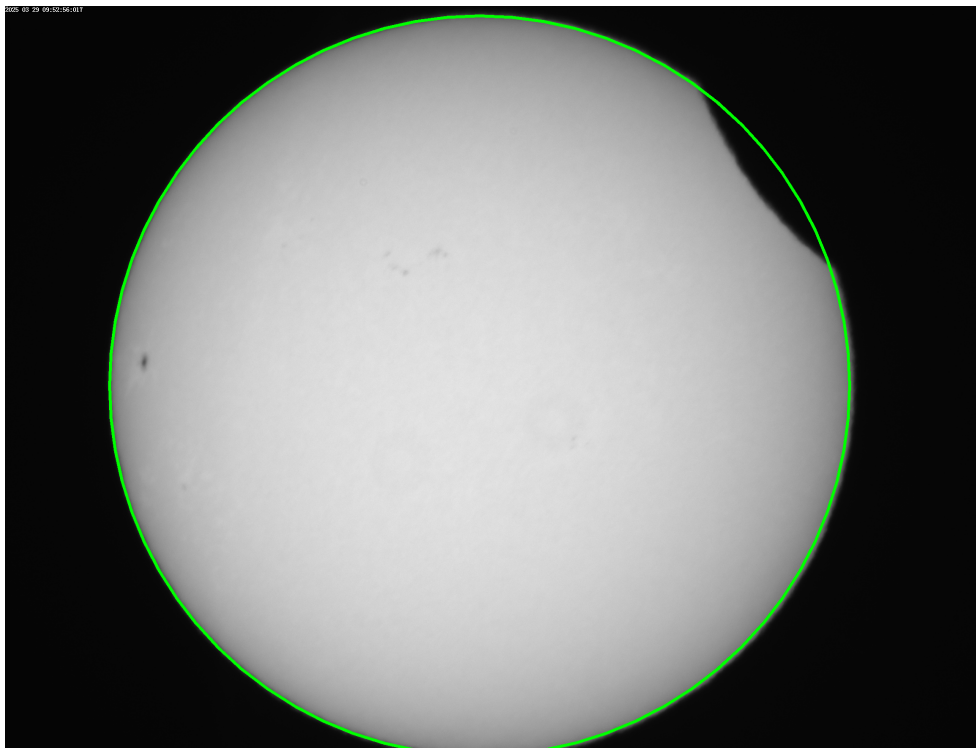


Figura 2. *Cálculo de la circunferencia solar a partir de los puntos seleccionados.*

3.1. Control de errores y reintentos

Dado que las condiciones de imagen pueden variar de forma significativa entre fotogramas — debido a ruido, mala definición de bordes o regiones parcialmente ocultas — el algoritmo incorpora mecanismos de control de errores y reintentos que permiten mantener la estabilidad del ajuste y evitar falsas detecciones.

En primer lugar, cada etapa crítica del procesamiento incluye criterios de validación. Por ejemplo:

- Si el número de puntos detectados en el borde solar o lunar es inferior a tres, el fotograma es descartado.
- Si el radio solar calculado difiere en más de un 10% del valor medio calculado en los primeros 30 frames, el ajuste se considera inestable y se desecha o se reintenta con puntos desplazados.
- Si no se encuentran puntos de intersección entre las circunferencias solar y lunar, el ajuste se considera inválido.

Además, en caso de que el ajuste inicial con los tres puntos elegidos no produzca una solución geométricamente válida (por ejemplo, una circunferencia indefinida o con radio anómalo), se implementa un sistema de reintentos. Este consiste en aplicar un desplazamiento cíclico (*roll*) sobre el conjunto de puntos detectados, de modo que se reevalúe el ajuste usando diferentes combinaciones de puntos.

Se permiten hasta seis intentos por fotograma. Si todos los intentos fallan, el fotograma es marcado como no aceptado y no se incluye en los resultados. Este mecanismo permite tolerancia frente a variaciones locales y evita decisiones irreversibles basadas en un único conjunto de puntos ruidosos.

Este enfoque balancea la necesidad de robustez con la eficiencia computacional, permitiendo cubrir una amplia gama de condiciones de calidad de imagen sin comprometer la fiabilidad del ajuste final.

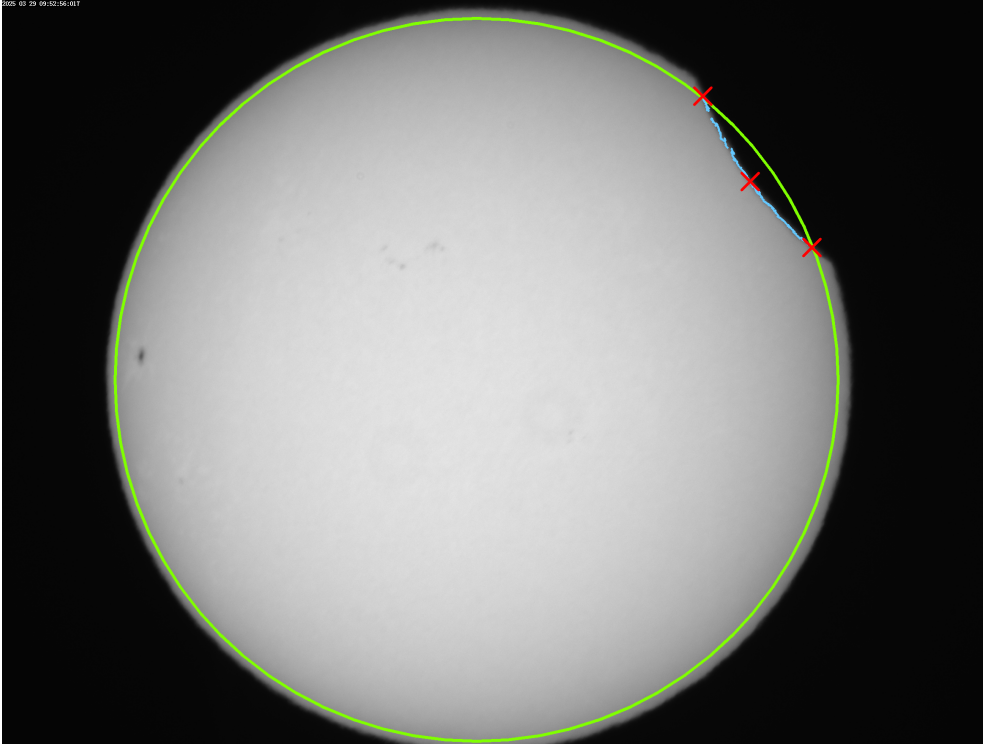


Figura 3. Detección del borde lunar (en azul) usando una máscara (contorno exterior marcado en verde) interior al círculo solar y determinación de puntos (en rojo).

4. Cálculo del instante de contacto

Una vez que se ha generado el archivo CSV con los valores de profundidad de intersección a lo largo del tiempo, se procede a estimar el instante exacto del contacto (C_1 o C_4) mediante un ajuste lineal y extrapolación. El proceso se realiza de la siguiente manera:

1. Selección del archivo y configuración temporal.

Se carga el archivo .csv correspondiente al contacto que se desea estudiar, y se define un valor de referencia: el *tiempo previsto* del contacto según efemérides.

2. Filtrado inicial.

Se eliminan del conjunto de datos todos aquellos puntos cuya profundidad de intersección supere un valor, y se restringe el análisis a los datos anteriores o posteriores a un límite temporal definido. Esta operación descarta valores en un rango cercano al contacto, que podrían deteriorar el ajuste.

3. Conversión temporal.

Se calcula la variable independiente en segundos desde el primer *timestamp* del subconjunto seleccionado:

$$t = \text{timestamp} - t_0$$

4. Ajuste preliminar y detección de outliers.

Se ajusta una recta por mínimos cuadrados a todos los puntos:

$$A(t) = mt + b$$

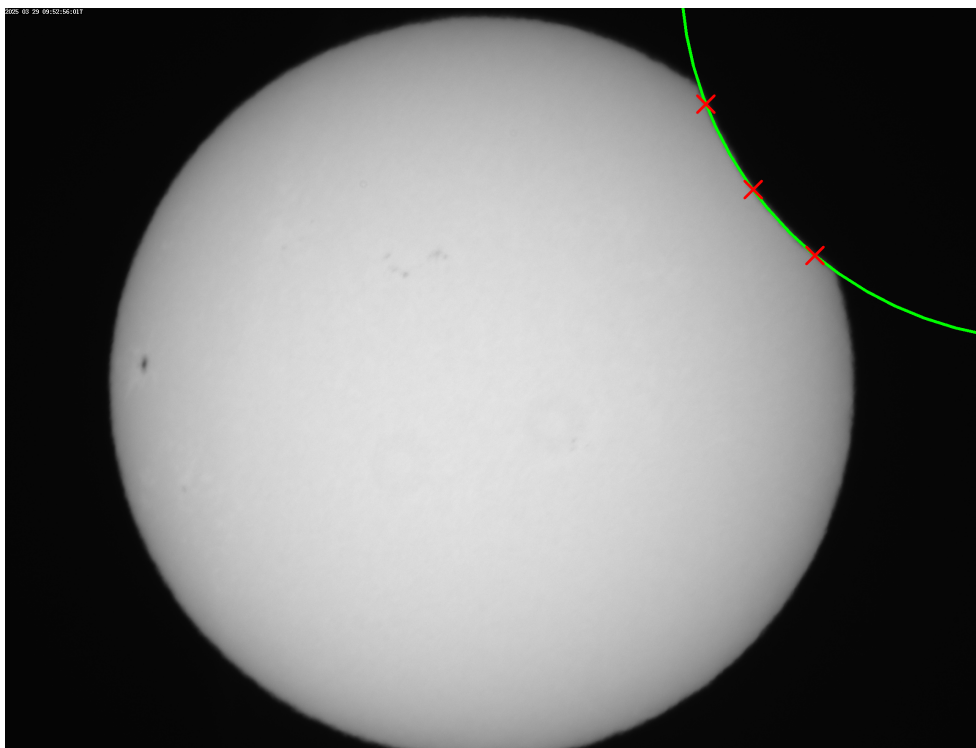


Figura 4. Cálculo de la circunferencia lunar (en verde) a partir de los puntos seleccionados (en rojo)..

Se calculan los residuos y su desviación estándar σ . Se eliminan los puntos cuyo residuo supere 2σ en valor absoluto, lo que permite depurar el conjunto de datos de valores atípicos.

5. Ajuste definitivo.

Con los datos depurados, se repite el ajuste lineal para obtener un modelo más robusto de la evolución de la profundidad de intersección con el tiempo.

6. Estimación del contacto.

El instante de contacto se estima resolviendo:

$$A(t) = 0 \Rightarrow t_c = -\frac{b}{m}$$

Finalmente, se convierte este valor en un timestamp UTC sumándolo a t_0 .

La incertidumbre asociada a este instante se ha obtenido mediante propagación de los errores estándar de la pendiente y la ordenada del ajuste lineal, aplicando los principios básicos del análisis de errores descritos por Taylor (1997) [3].

7. Comparación con el tiempo previsto.

Se calcula la diferencia entre el tiempo estimado y el tiempo previsto según efemérides, expresándola en segundos. Esto permite evaluar la precisión del método.

8. Visualización.

Se genera un gráfico con los datos originales, los datos filtrados, la recta de ajuste, y las líneas verticales correspondientes al tiempo previsto y al estimado. Esto permite inspeccionar visualmente la calidad del ajuste y la concordancia entre predicción y observación.

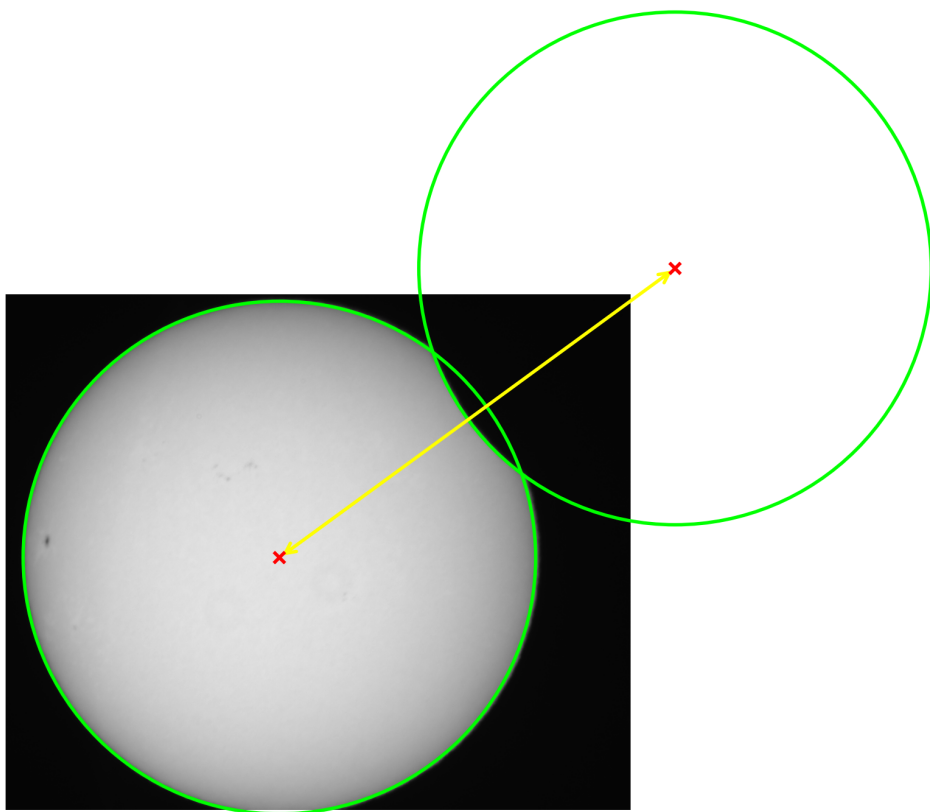


Figura 5. La profundidad de intersección se estima usando la distancia entre centros de las circunferencias calculadas.

5. Resultados

Aplicando el procedimiento descrito para la estimación de los instantes de contacto se han obtenido los siguientes resultados:

- **Contacto C₁:** Estimación temporal: 09:48:18.46 UTC $\pm$ 2.6 s
Desviación respecto al tiempo previsto: -1.2 s
- **Contacto C₄:** Estimación temporal: 11:33:58.79 UTC $\pm$ 2.0 s
Desviación respecto al tiempo previsto: $+20.7$ s

La desviación mostrada es en relación a lo indicado por las efemérides calculadas para la ubicación del observador (latitud $40^{\circ} 27' 38.6''$ N, longitud $3^{\circ} 52' 51.3''$ W) , según los datos proporcionados por xjubier.free.fr.

Para realizar el ajuste en cada caso, se ha aplicado un criterio de filtrado temporal para descartar medidas próximas al instante previsto de contacto, de forma que no se han considerado los últimos 90 segundos antes de C₁ y los últimos 90 segundos antes de C₄. La selección del subconjunto de datos, de acuerdo con el mencionado filtrado temporal, se ha realizado cuidadosamente mediante inspección visual previa de la nube completa de puntos. En particular, se ha puesto especial atención en conservar la tendencia lineal, evitando valores próximos al punto de cruce que no proporcionan una medida fiable

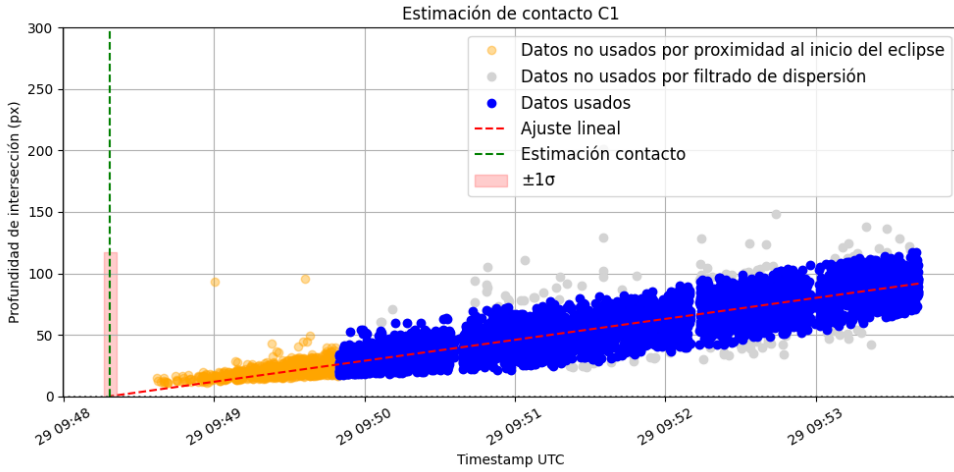


Figura 6. Estimación de C_1 .

con el presente método. Esta filtración discrecional evita que la pérdida local de linealidad comprometa la estimación temporal.

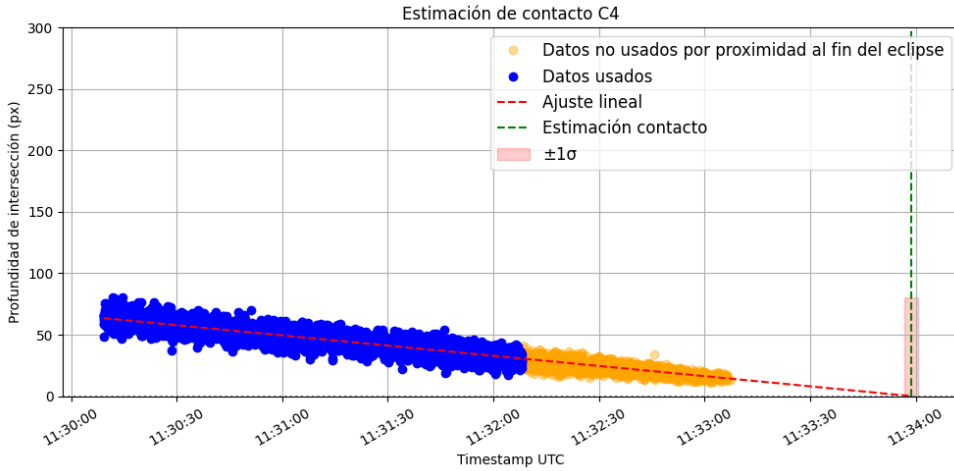


Figura 7. Estimación de C_4 .

Cabe destacar que las marcas temporales asociadas a cada fotograma son altamente fiables: se utilizó un servidor de tiempos de stratum 1 sincronizado por GPS, que emplea señal PPS (*pulse per second*), lo cual garantiza una precisión del orden de microsegundos en la marca UTC de cada imagen.

La incertidumbre en la estimación del instante de contacto se ha calculado a partir de la dispersión de los datos empleados en el ajuste lineal. Para ello, se han tenido en cuenta las incertidumbres individuales de la pendiente y la ordenada de la recta obtenida, y se ha propagado su efecto sobre la estimación final del instante en el que la intersección entre los discos desaparece. Este método proporciona una medida objetiva de la precisión del resultado, basada en la calidad del ajuste y no en supuestos externos.

6. Discusión

Los resultados obtenidos muestran, en relación con las efemérides astronómicas, coincidencia dentro de la incertidumbre del método en el inicio del eclipse (contacto C_1) pero desviación de aproximadamente 20 segundos de retraso en la terminación del eclipse (contacto C_4). Dado que se descarta un error en la sincronización temporal de los datos, esta desviación podría deberse a errores en la detección de bordes, o incluso diferencias entre el modelo astronómico de referencia utilizado por el generador de efemérides y la realidad observacional. Este comportamiento merece ser investigado en futuras campañas mediante la comparación con otros métodos independientes o con simulaciones geométricas más detalladas.

Además, el criterio de selección temporal empleado —discrecional y basado en excluir zonas con geometría más compleja— puede introducir sesgos difíciles de cuantificar sin un análisis de sensibilidad más riguroso. Aun siendo razonable en su motivación, este procedimiento introduce una incertidumbre no explícita en la estimación, que debe tenerse en cuenta al interpretar los resultados. La incertidumbre final se ha calculado considerando la dispersión de los datos ajustados y propagando sus errores hasta el instante estimado de contacto, lo que permite expresar el resultado con un margen temporal bien definido.

La asunción de que la profundidad de intersección evoluciona de manera lineal cerca del contacto también puede ser una simplificación excesiva, especialmente si hay irregularidades en la forma de los bordes detectados o si la Luna no avanza exactamente en dirección perpendicular al limbo solar.

En futuras campañas podría explorarse aumentar el número de puntos para la detección de los radios, la sensibilidad del método a la elección de los puntos de ajuste, así como incorporar métodos de ajuste no lineal o modelos geométricos más completos. También sería útil comparar los resultados con observaciones independientes (visuales, espectroscópicas o fotométricas) o con simulaciones precisas de la geometría solar-lunar. También sería interesante comparar los resultados obtenidos con predicciones generadas mediante software especializado como Occult 4 [5], que permite calcular con precisión los instantes esperados de contacto según modelos astronómicos completos.

Herramientas como *Solar Eclipse Timer* han sido desarrolladas precisamente para facilitar la planificación y sincronización de observaciones de contactos [4], aunque no aportan resolución suficiente para una determinación geométrica automatizada.

La observación visual de fenómenos como las Perlas de Baily o el anillo de diamante también puede ser útil para validar experimentalmente los instantes de contacto [6].

7. Conclusiones

Se ha presentado un método geométrico automatizado para la estimación de los contactos C_1 y C_4 en eclipses solares parciales, a partir del análisis de secuencias de vídeo grabadas en formato .ser con marcas temporales de alta precisión. El enfoque combina detección de bordes, ajuste de circunferencias y análisis temporal para inferir el instante de contacto mediante extrapolación de la profundidad de intersección entre los discos solar y lunar.

Los resultados obtenidos son coincidentes con las efemérides en el inicio, pero muestran una desviación de aproximadamente 20 segundos de retraso en la terminación del eclipse. Se han mencionado posibles fuentes de explicación de esta desviación, como la pérdida de linealidad en los datos cercanos al cruce, una menor calidad geométrica en los últimos fotogramas, o errores sistemáticos en la detección del borde lunar. Cabe señalar que las efemérides utilizadas como referencia se basan en modelos astronómicos que incluyen supuestos específicos sobre los radios aparentes del Sol y la Luna, así como sobre la definición geométrica exacta del instante de contacto. Por tanto, parte de la desviación observada podría atribuirse a diferencias entre los criterios empleados en el cálculo y los aplicados en el presente método experimental. Esta posibilidad refuerza la necesidad de comparar sistemáticamente los resultados con

efemérides generadas mediante distintos softwares y marcos de referencia.

Este trabajo pone de manifiesto la viabilidad de realizar medidas temporales precisas en eclipses parciales con equipamiento asequible y técnicas de análisis reproducibles. En futuras observaciones se propone mejorar la modelización geométrica, refinar el tratamiento de los bordes detectados, y contrastar los resultados con métodos alternativos o simulaciones detalladas para consolidar la robustez del enfoque.

References

- [1] J. M. Valenzuela and R. Valenzuela (2021). *Sizing the Sun from a Solar Eclipse*. <https://aasnova.org/2021/10/29/sizing-the-sun-from-a-solar-eclipse/>
- [2] F. Espenak (2006). *Fifty Year Canon of Solar Eclipses: 1986–2035*. NASA/TP–2006–214141. <https://eclipse.gsfc.nasa.gov>
- [3] J. R. Taylor (1997). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. 2nd edition. Sausalito, California: University Science Books.
- [4] Gordon (2023). Solar Eclipse Timer - Help File. <https://www.solarecliptimer.com/help-file.html>. Accessed: 2025-04-01.
- [5] D. Herald (2023). Occult 4 - Software for Occultation Predictions. <http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>. International Occultation Timing Association
- [6] Eclipse Tours (2023). Eclipse Edge Observation. <https://www.eclipsetours.com/eclipse-edge-observation/>. Accessed: 2025-04-01. (IOTA).