

Artículo original

Análisis de la influencia del eclipse solar anular del 14 de octubre del 2023 en la variación de la gravedad vertical medida con un gravímetro CG-5

Analysis of the influence of the October 14, 2023, annular solar eclipse on the variation of vertical gravity measured with a CG-5 gravimeter

 Laura Daniela Jiménez-Prada*,  Bryan Steven Reina-Mejía,
 Luis Hernán Ochoa-Gutiérrez

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

El eclipse solar anular ocurrido el 14 de octubre del 2023 fue visible en Norteamérica y en zonas de Centroamérica y Suramérica. En Colombia se pudo ver en fase anular o parcial en todo el territorio nacional. La zona de anularidad cruzó de occidente a oriente los departamentos de Chocó, Quindío, Tolima, Huila, Meta, Guaviare, Vaupés, Caquetá y Amazonas. El objetivo de este estudio fue analizar la posible atenuación de la gravedad durante el eclipse mediante mediciones gravimétricas de alta precisión realizadas en Aipe (Huila) entre las 3:05 UTC-05 del 13 de octubre y las 11:31 UTC-05 del 15 de octubre del 2023 utilizando un gravímetro CG-5. Para sustentar la interpretación se revisaron trabajos previos que proponen mecanismos como la dispersión o la absorción gravitacional, así como modelos teóricos que predicen patrones específicos en la señal gravimétrica durante eclipses. Aunque las variaciones detectadas fueron sutiles, se registraron descensos en la gravedad que coinciden con fases críticas del eclipse, especialmente antes del primer contacto y después del último. Estas variaciones se alinean con modelos como el de Múnera (2011) y Heriyanto (2022), y con estudios anteriores desarrollados en China y Europa, lo que, más allá de los valores absolutos, aporta evidencia coherente de un posible efecto de atenuación gravitacional asociado a la geometría del eclipse.

Palabras claves: Eclipse solar; Gravedad vertical; Eclipse anular; Atenuación gravitacional.

Abstract

The annular solar eclipse of October 14, 2023, was visible in North America and parts of Central and South America. In Colombia, the eclipse was seen in the annular and partial phases throughout the country. The annular zone crossed the departments of Chocó, Quindío, Tolima, Huila, Meta, Guaviare, Vaupés, Caquetá, and Amazonas from west to east. This study aimed to analyze the possible attenuation of gravity during the eclipse using high-precision gravimetric measurements taken in Aipe (Huila) between 3:05 UTC-05 on October 13 and 11:31 UTC-05 on October 15, 2023, with a CG-5 gravimeter. To support the interpretation, we reviewed previous works that propose mechanisms such as gravitational scattering or absorption and theoretical models that predict specific patterns in the gravimetric signal during eclipses. Although the variations detected were subtle, decreases in gravity were recorded coinciding with critical phases of the eclipse, especially before the first contact and after the last one. These variations align with models such as those of Múnera (2011) and Heriyanto (2022), as well as previous studies developed in China and Europe, and provide, beyond absolute values, consistent evidence of a possible gravitational attenuation effect associated with eclipse geometry.

Keywords: Solar eclipse; Vertical gravity; Annular eclipse; Gravitational attenuation.

Citación: Jiménez-Prada LD, *et al.*
Análisis de la influencia del eclipse solar anular del 14 de octubre del 2023 en la variación de la gravedad vertical medida con un gravímetro CG-5. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2025 Ago 29. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefy.3212>

Editor: Santiago Vargas Domínguez

***Correspondencia:**

Laura Daniela Jiménez-Prada;
ljimenezpr@unal.edu.co

Recibido: 23 de abril de 2025

Aceptado: 10 de agosto de 2025

Publicado en línea: 29 de agosto de 2025



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

A pesar de que, en teoría, la gravedad lunar durante un eclipse solar se alinea con el sistema gravitacional Tierra-Sol, es difícil demostrar su efecto de manera experimental. Se ha estudiado la posible existencia de absorción de ondas gravitacionales y se han realizado algunos análisis teóricos sobre un débil blindaje lunar en la interacción Tierra-Sol. Según **Yang y Wang** (2002), las variaciones pequeñas alrededor del máximo eclipse son complicadas de entender y pueden tener múltiples causas. Los autores proponen tres posibilidades: no se presenta absorción gravitacional por parte de la Luna, la posible anomalía es muy pequeña y no puede ser detectada por la precisión del gravímetro o, si ocurre cierta absorción gravitacional por parte de la Luna, esta se anula o se reduce drásticamente por la superposición de atracciones gravitacionales tras la alineación Sol-Luna-Tierra.

Para explicar estos posibles efectos, **Heriyanto** (2022) propuso el denominado ‘modelo de tendedero’ (*Clothesline Model*, CM), con el cual intentó describir el comportamiento gravimétrico en varios eclipses lunares y solares. De forma paralela, **Múnera** (2011) planteó el modelo de atenuación por la luna, el cual sostiene que la atenuación de la gravedad durante los eclipses solares está dominada por la dispersión elástica del flujo gravitacional y no por la absorción, como se creía tradicionalmente. Esta propuesta se inscribe dentro de una línea de investigación más amplia que ha explorado la posibilidad de una atenuación gravitacional asociada a la alineación de los astros durante un eclipse. Según **Múnera** (2011), uno de los primeros en abordar este fenómeno fue Quirino Majorana, quien propuso un coeficiente universal de atenuación h basado en experimentos de laboratorio con materiales densos y aplicó a la gravedad una fórmula análoga a la de la absorción de radiación:

$$F_{Majorana} = F_{Newton} \cdot \exp\left(-h \int \rho(r) dr\right),$$

donde $F_{Majorana}$ representa la fuerza gravitacional atenuada, F_{Newton} es la fuerza gravitacional clásica, $\rho(r)$ es la densidad del material atravesado en función de la distancia r ; y h es un coeficiente de atenuación, interpretado por Majorana como una posible constante universal de “extinción” (*quenching factor*) (Quirino Majorana, 1919, 1920, citado en **Múnera**, 2011).

Sin embargo, esta idea fue fuertemente cuestionada. Russell (1921, citado en **Múnera**, 2011), advirtió que un valor elevado de h implicaría una disminución efectiva de la masa gravitacional del Sol, lo que afectaría la estabilidad orbital de los planetas. Por su parte, Crowley *et al.* (1974, citados en **Múnera**, 2011) argumentaron que la absorción gravitacional, de existir, debería manifestarse en forma de calentamiento detectable en el interior de cuerpos planetarios, algo que no se observa geotérmicamente. Esto llevó a estimaciones mucho menores del coeficiente h , del orden de 10^{-28} a 10^{-30} cm²/g, en contraste con los resultados de laboratorio.

Pese a estas objeciones, en varios experimentos llevados a cabo durante eclipses se han documentado anomalías que han renovado el interés en esta hipótesis. En 1954, Tomaschek registró dos valles laterales en la señal gravimétrica durante un eclipse solar en las islas Shetland, aunque desestimó el hallazgo al no coincidir con una curva de atenuación centrada en la fase máxima del eclipse. Posteriormente, durante el eclipse solar total del 9 de marzo de 1997 en China, Wang y Yang reportaron anomalías similares utilizando un gravímetro LaCoste–Romberg. Observaron dos mínimos en la señal gravimétrica, uno antes del primer contacto y otro después del último, que inicialmente se atribuyeron a un posible sombreado gravitacional lunar. Más tarde plantearon una explicación alternativa basada en movimientos rápidos de masas de aire, aunque otros autores han cuestionado la plausibilidad física de esta hipótesis (**Múnera**, 2011).

Frente a estos antecedentes, **Múnera** (2011) retoma la idea de Majorana, pero introduce una corrección clave: el coeficiente de atenuación h no debe ser tratado como una constante universal, sino como un parámetro empírico dependiente de la composición

atómica y nuclear del medio (Z, N) (Múnera, 2011). Este enfoque permite reconciliar las discrepancias entre los valores observados en el laboratorio y los obtenidos mediante registros gravimétricos durante los eclipses.

Este enfoque se articula con la comprensión contemporánea de la gravedad como un fenómeno dinámico y multivariable. Según Toledo (2020), por ejemplo, la aceleración de la gravedad puede expresarse de forma general como una función que depende de múltiples factores:

$$g = g(\mu, \omega^2, P, \rho, t),$$

donde μ es el potencial gravitacional, ω^2 la componente centrífuga asociada a la rotación terrestre, P la presión atmosférica, ρ la densidad del medio, y t el tiempo. Esta expresión evidencia la complejidad de los sistemas gravimétricos, en los que la señal observada es el resultado de la interacción de diversas variables físicas y ambientales.

Como lo resalta Toledo (2020), una señal de marea no se limita únicamente al efecto de la marea terrestre (la deformación elástica global de la Tierra), sino que también incorpora la carga oceánica mareal, es decir, la redistribución del agua en los océanos bajo la influencia gravitacional lunar y solar, y factores locales como las variaciones en las propiedades elásticas del terreno. Ello significa que la señal gravimétrica es una superposición de múltiples efectos cuya dinámica puede enmascarar cambios sutiles asociados a eventos astronómicos. Así, cualquier intento por detectar una posible atenuación gravitacional durante un eclipse debe considerar el ruido de fondo generado por estas componentes, además del hecho de que sus interacciones no siempre son lineales ni fácilmente predecibles. Esta complejidad resalta la importancia de comparar los registros observados con los patrones teóricos propuestos por distintos modelos, y no solo evaluar la magnitud del cambio observado.

Materiales y métodos

Se estudió el eclipse solar anular del 14 de octubre de 2023 (Tabla 1, Figura 1) utilizando un gravímetro relativo con una resolución de 0,001 mGal (equivalente a 1 μ Gal). Las mediciones gravimétricas se realizaron entre las 3:05 UTC-05 del 13 de octubre y las 11:31 UTC-05 del 15 de octubre de 2023. La estación, con posición global $\phi = 03^{\circ}13'16.84''$ N y $\lambda = 75^{\circ}14'05.65''$ W (Aipe, Huila), se encontraba a una altitud de 398,0 m en la zona con el mayor ocultamiento nacional (90,50 %).

Tabla 1. Cronología de las fases del eclipse anular del 14 de octubre de 2023 en Aipe (Huila). Fotografías por cortesía de Andrés Molina

ECLIPSE SOLAR ANULAR (5m 15.1s)			
Coordenadas de la estación		Longitud: 75° 14' 05.65" W	
		Latitud: 3° 13' 16.84" N	
Fase del evento principal ($\Delta t=69.1s$; alt. $\approx 398m$)	Inicio de la anularidad	Máximo (90.65%)	Fin de la anularidad
			
Hora local	1:34:15 p. m.	1:36:53 p. m.	1:39:30 p. m.
Altitud del sol	60.9°	60.3°	59.7°

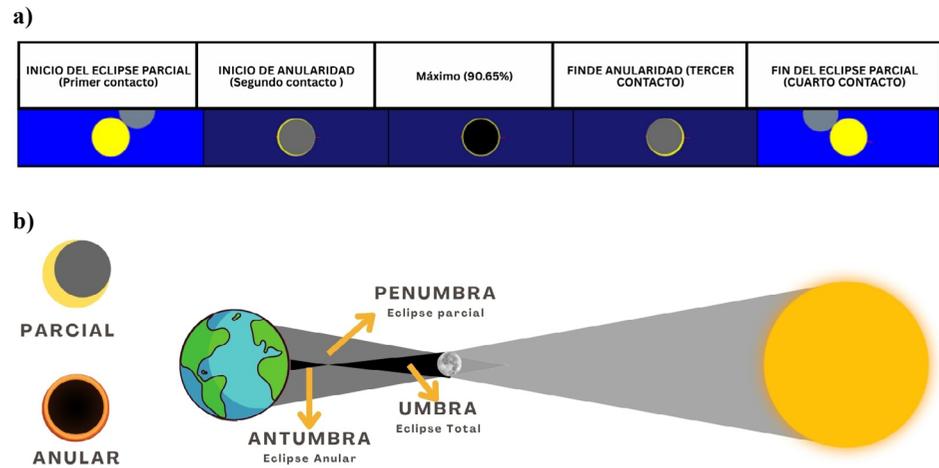


Figura 1. (a) Ilustraciones de las fases del eclipse anular del 14 de octubre de 2023 en Aipe (Huila). **(b)** Modelo de alineación de los astros durante un eclipse solar

Según el sitio web ‘Eclipse’ del centro de vuelos espaciales Goddard de la NASA, en las coordenadas mencionadas el eclipse parcial iniciaría a las 11:48:56 UTC-05 con el Sol a 79 ° sobre el horizonte oriental, la máxima ocultación se daría a las 13:36:46 UTC-05 y finalizaría (fin del eclipse parcial) a las 15:16:12 UTC-05 con el Sol a una altura de 37 ° cayendo sobre el occidente. Específicamente, el eclipse anular ocurriría de las 13:34:08 UTC-05 a las 13:39:24 UTC-05. Debido a que estos tiempos están fundamentados en modelos matemáticos teóricos, todos presentan una incertidumbre de 70,5 segundos.

El gravímetro CG-5 utilizado procesa y aplica correcciones a las señales del sensor de gravedad, almacena datos, los formatea para su salida y realiza las funciones de control del instrumento necesarias. Además de estar contenido en una cámara de vacío, el equipo hace diversas correcciones por defecto, incluidos el ruido, la deriva instrumental, la marea, la temperatura, la inclinación del instrumento, el rechazo avanzado de lecturas ruidosas, el filtro de ruido sísmico y las correcciones de terreno cercano.

El muestreo se diseñó de manera que incluyera mediciones previas y posteriores al evento, permitiendo un periodo de estabilización del sistema del instrumento. Con el fin de garantizar la precisión de las mediciones, el gravímetro se mantuvo a una temperatura constante dentro de una habitación tranquila.

Durante la recolección de datos en campo, se almacenaron promedios de seis lecturas corregidas cada 35 segundos, con una frecuencia de adquisición de una lectura cada cinco segundos. Se aplicaron correcciones automáticas por deriva instrumental (para eliminar efectos sistemáticos por relajación del resorte), inclinación (para compensar desviaciones con respecto a la vertical), temperatura (ajustando según el coeficiente térmico del resorte) y marea terrestre (basada en el modelo de Longman (1959), con un factor gravimétrico de 1,16 para simular la deformación elástica de la Tierra). Cabe señalar que dicho modelo no considera efectos mareales oceánicos ni variaciones locales del factor gravimétrico, lo que pueden inducir errores de hasta $\pm 3 \mu\text{Gal}$ (Scintrex Limited, 2012; Miranda et al., 2013). Para reducir el ruido instrumental, se empleó un criterio estadístico que descartó mediciones que excedían cuatro desviaciones estándar con respecto al promedio. Estas correcciones automáticas se ejecutan internamente al configurar el equipo para la toma continua, sin necesidad de intervención manual en campo.

A pesar de que las variaciones en la presión atmosférica afectan la gravedad con una admitancia estándar de $-0,3 \mu\text{Gal/hPa}$ (Torge, 1989; Merriam, 1992, citados en Miranda et al., 2013), el gravímetro CG-5 se encuentra encerrado en una cámara de vacío, lo que proporciona un aislamiento eficaz frente a estos cambios. Según Miranda et al. (2013), en

condiciones similares de medición pueden alcanzarse correcciones por presión atmosférica del orden de -8 a $+2 \mu\text{Gal}$, dependiendo de la altitud y de la correspondiente reducción de la presión al nivel del mar.

Con el fin de aislar posibles efectos no periódicos, el procesamiento se hizo en dos etapas: a la serie temporal completa se le aplicó un suavizado por ventana móvil de 10 muestras, a las que se les restó su media para centrar los valores y así visualizar si persistían fluctuaciones de alta frecuencia y resaltar tendencias dominantes; posteriormente, se recortó la ventana temporal correspondiente a la duración del eclipse y se repitió la eliminación de la media para evaluar el comportamiento anómalo de la señal en ese intervalo.

Además, al almacenar la corrección de marea, se analizaron en paralelo los valores de este efecto gravitatorio constante con los datos muestreados, siguiendo lo formulado en el modelo de **Longman** (1959) para una Tierra elástica mejorada con los parámetros de Love.

Resultados

La componente de marea se calculó teóricamente utilizando el modelo de **Longman** (1959) para una Tierra elástica mejorada mediante los parámetros de Love, modelo que el gravímetro implementó automáticamente. El instrumento usó un factor gravimétrico de 1,16 y mantuvo una precisión de $1 \mu\text{Gal}$ ($1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$). La serie temporal de este efecto (**Figura 2**) está dominada por un período semidiurno y está en fase con la señal semidiurna de variación gravitacional observada, lo cual pone en evidencia que la discrepancia entre la teoría y la observación radica, en parte, en un factor de escala entre ambos que corresponde a la exactitud del valor del factor gravimétrico adoptado en el modelo (**Toledo**, 2020). Si a la fecha del evento, la Tierra se hubiese encontrado próxima al perihelio, el efecto de marea solar se habría amplificado; sin embargo, en este caso, la Tierra estaba en camino de alcanzar su máximo acercamiento al Sol, que duraría hasta el 3 de enero de 2024.

La **Figura 3** muestra la variación de la gravedad vertical durante el día del eclipse atribuible a efectos físicos como la carga oceánica (mareal y no mareal) y, potencialmente, a un efecto de blindaje gravitacional. A pesar de este primer paso del procesamiento aplicado y de las correcciones automáticas del instrumento, se observó un patrón periódico, lo que sugiere que la corrección mareal realizada por el equipo no era completamente precisa (**Figuras 3**).

En contraste, a partir de la segunda etapa del procesamiento (**Figura 4**), sí se identificó un comportamiento anómalo en dos intervalos caracterizado por una disminución significativa de la gravedad que no parecía estar influenciada por la señal semidiurna de

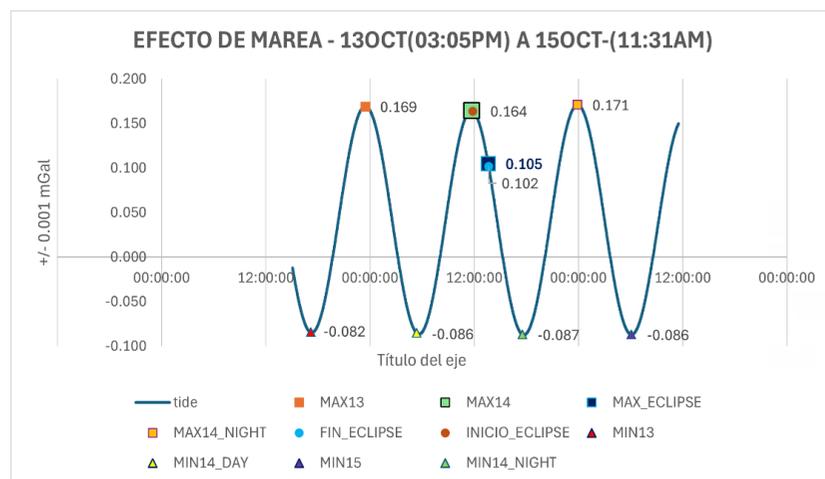


Figura 2. Corrección de marea a partir del modelo de Longman para una Tierra elástica mejorada por los parámetros de Love

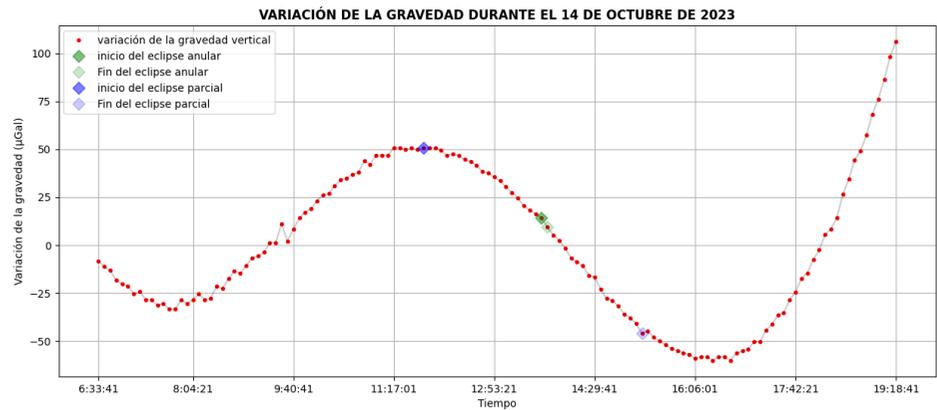


Figura 3. Variación de la gravedad vertical durante el 14 de octubre de 2023 en Aipe (Huila)

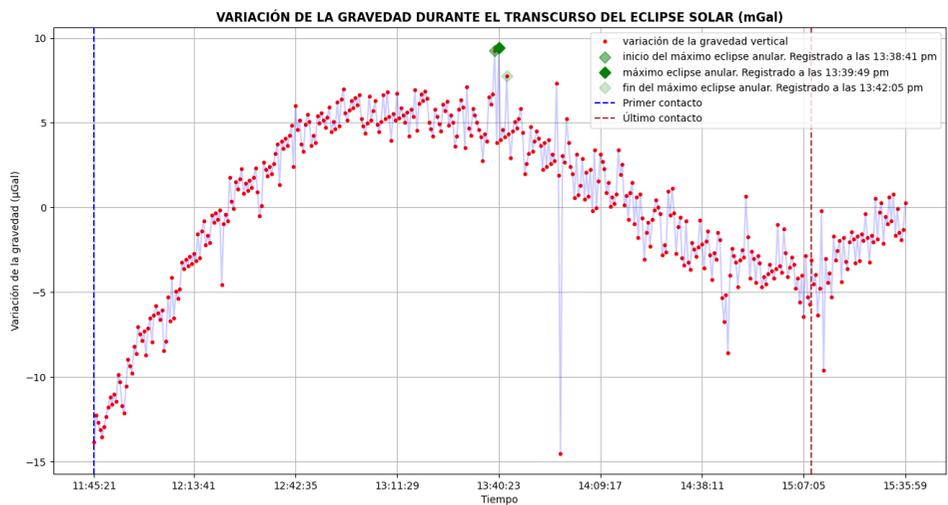


Figura 4. Variación de la gravedad vertical durante el eclipse solar anular del 14 de octubre de 2023 en Aipe (Huila)

la marea. Tales intervalos se ubicaron temporalmente alrededor de las 11:44 UTC-05, con una disminución máxima significativa de $-14,73 \mu\text{Gal}$, y sobre las 15:12 UTC-05, con un cambio máximo de $-9,71 \mu\text{Gal}$. Estos dos valles están estrechamente relacionados con las fases del primer y último contacto del eclipse, respectivamente (Yang & Wang, 2002).

Durante el periodo de máxima ocultación, la variación de la gravedad presentó tres picos, correspondientes al inicio, el punto máximo y el fin del eclipse anular medidos a las 13:38:41, las 13:39:49 y las 13:42:05 (UTC-05). Se omitió el pico de $-14,51 \mu\text{Gal}$ registrado a las 13:57 UTC-05 por considerarlo ruido instrumental.

La gravedad residual, centrada en torno a cero, tuvo una amplitud total de $166,47 \mu\text{Gal}$ (0.1665 mGal), con un valor máximo de $9,42 \mu\text{Gal}$ ($0,0094 \text{ mGal}$) durante el momento de mayor anularidad, cuando el ocultamiento solar alcanzó el 90,50 % debido a la interposición de la Luna (Toledo, 2020).

Discusión

El análisis simultáneo de la corrección de marea modelada y la señal observada evidenció una discrepancia en fase y amplitud. Aunque el gravímetro utiliza un factor gravimétrico de 1,16, como ya se mencionó, este valor puede variar ligeramente según la latitud. De

hecho, **Miranda et al.** (2013) reportaron que los factores de amplitud y fase determinados localmente pueden generar variaciones del 2,2 % en la señal mareal modelada comparada con la observada. En este caso, el uso de parámetros genéricos pudo haber introducido errores del orden de los microgales. En todo caso, se esperaría que la eliminación estadística de la tendencia en las mediciones durante el eclipse haya descartado cualquier variación ocasionada por la precisión de esta constante gravitacional.

La **Figura 5**, además de evidenciar la imprecisión en la corrección mareal del instrumento, muestra que el máximo ocultamiento solar no coincidió con la mayor señal de marea registrada (**Figura 2**) debido a que el evento no ocurrió cuando los astros estaban en su mínima distancia de la estación de medición. Al igual que en el estudio de **Toledo (2020)**, la sombra producida durante el eclipse no fue el punto en que los astros se hallaban más cercanos a la Tierra, lo que sería el caso si el eclipse hubiera ocurrido al mismo tiempo que el Sol y la Luna atravesaban el meridiano local. Además, si el evento hubiese coincidido con el perihelio de la Tierra, la variación gravimétrica habría sido aún mayor. En ese escenario hipotético, la aceleración de las mareas resultante de la suma de la atracción gravitacional de los cuerpos celestes y la aceleración orbital debida al movimiento de la Tierra alrededor del baricentro del sistema Tierra-Sol-Luna, alcanzaría su valor máximo posible (**Toledo, 2020**).

Además, los tiempos predichos matemáticamente no se ajustan con exactitud a los tiempos demostrados por los datos debido al intervalo entre las mediciones, la incertidumbre de los tiempos del modelo, los posibles errores del modelo y, probablemente, a una pequeña diferencia entre el momento en que el evento ocurrió y su efecto *in situ*.

Como se ve en la **Figura 3**, la señal residual que alcanzó la resolución del gravímetro puede adjudicarse mayormente al efecto de la carga oceánica presente durante la medición, cuya amplitud puede llegar a decenas de microgales. Dado que Aipe se encuentra alejado de las grandes cuencas oceánicas y la zona costera, donde según **Hinderer et al.** (2015) la carga de marea oceánica puede oscilar entre el 1 % y el 10 % de la marea terrestre, la señal de marea oceánica no coincidirá con la terrestre por un retraso en tiempo asociado a la variación de la batimetría y la topografía.

El ruido producido por este efecto, así como la componente astronómica real de la marea, podrían corregirse de manera más efectiva si se dispusiera de un gravímetro absoluto en la estación de base y números de Love mejorados para el modelo de tierra elástica.

Miranda et al. (2013) demostraron que la calibración del gravímetro CG-5 con parámetros locales permite estimar el factor de escala con errores del orden de 10^{-4} y variaciones menores al 0,0034 %. En este estudio no hicimos una calibración experimental específica, por lo que no puede descartarse una desviación instrumental del orden de

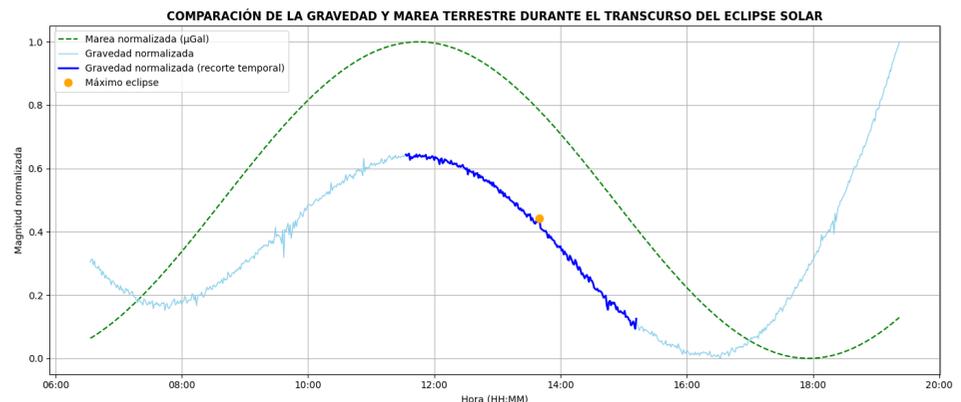


Figura 5. Comparación entre la marea terrestre modelada y la gravedad vertical medida durante el eclipse solar anular del 14 de octubre de 2023 en Aipe (Huila). El gráfico evidencia la imprecisión de la corrección mareal automática del instrumento y muestra un desfase temporal entre el máximo de la señal de marea y el momento de máximo ocultamiento solar.

1–2 μGal . Si bien este valor es relativamente bajo en términos absolutos, representa hasta el 20 % del valor máximo registrado durante la anularidad (9,42 μGal). Esta proporción, aunque pequeña frente al rango total de la señal residual, podría afectar la interpretación si no se identifican y controlan adecuadamente otras fuentes de error, como la señal de carga oceánica no mareal o las interferencias atmosféricas menores. Pese a estas limitaciones, los valores de corrección por presión atmosférica se vieron mitigados por la cámara de vacío del instrumento. **Miranda *et al.* (2013)** estimaron una corrección de entre -8 y 2 μGal bajo condiciones similares de medición. Para evaluar la señal de interés en este estudio, se procesaron únicamente los datos alrededor del eclipse (**Figuras 4 y 5**). Así, al discriminarse las frecuencias del efecto de marea con respecto al efecto del eclipse, los cambios reales y notables obtenidos implicarían algún fenómeno asociado con el eclipse solar. Según el modelo de tendadero propuesto por **Heriyanto (2022)**, esta variación de aceleración gravitacional se debe en parte a la influencia del factor de amortiguación de la Luna contra las perturbaciones del Sol y la Tierra. Cuando la Luna inicia el primer contacto parcial del eclipse, el Sol y esta comienzan a interferir con la curvatura del espacio-tiempo en la Tierra, lo que provoca la curvatura negativa del espacio-tiempo terrestre vista parcialmente en el primer mínimo anómalo observado en la **Figura 4**. El efecto amortiguador de la Luna aumenta desde el inicio del primer contacto hasta el final de esta fase. Durante este periodo, la curvatura del espacio-tiempo en la Tierra, influenciada por el Sol, tiende a incrementarse. Este patrón se detiene cuando la Luna alcanza su máxima anularidad. En la fase máxima, la curvatura del espacio-tiempo en la Tierra y el Sol alcanza su valor máximo durante el evento, al igual que la amortiguación de la Luna contra las perturbaciones solares. La fase del segundo contacto parcial sigue un proceso inverso al del primer contacto, lo que explica el segundo valle en el patrón gravitacional (**Figura 6**) (**Heriyanto, 2022**).

De forma complementaria, el modelo propuesto por **Múnera (2011)** plantea una interpretación alternativa para las anomalías gravimétricas registradas durante eclipses solares, la cual se basa en la dispersión gravitacional más que en la absorción. Como ya se mencionó en la introducción, Múnera retoma la hipótesis de atenuación de la gravedad formulada originalmente por Quirino Majorana (1919, 1920, 1921; citado en **Múnera, 2011**).

Múnera extiende el modelo de Majorana mediante una analogía con la dispersión de rayos gamma y descompone el coeficiente de atenuación como:

$$h = h_A + h_S + h_D,$$

donde h_A representa la absorción, h_S la dispersión elástica y h_D una posible deflexión (despreciada en su estudio). Su modelo propone que la Luna actúa como una pantalla dispersora del flujo gravitacional solar. Para elevaciones solares bajas, como la de este estudio, el modelo predice una curva gravimétrica con dos valles laterales flanqueados por picos de dispersión en los bordes, en lugar de una única depresión centrada en la fase máxima del eclipse (**Figura 7**).

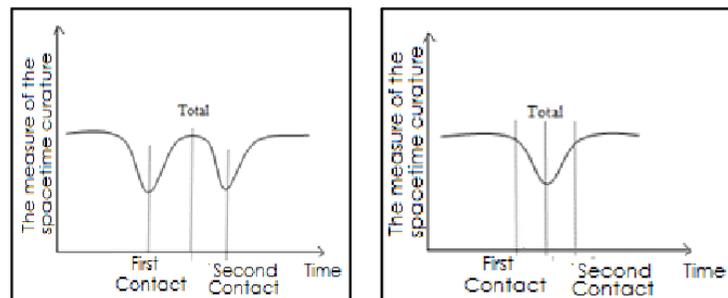


Figura 6. Patrón de variación de la curvatura del espacio-tiempo de la Tierra y el Sol durante un eclipse solar total de acuerdo con el modelo de tendadero propuesto por **Heriyanto (2022)**. Reproducido de **Heriyanto (2022)**.

El modelo de Múnera se ha mostrado consistente con las observaciones de por lo menos seis eclipses ocurridos entre 1954 y 1999 en los cuales se registraron patrones de doble valle, incluidos los trabajos de Wang y Yang durante el eclipse del 9 de marzo de 1997 (Múnera, 2011). De hecho, este modelo puede explicar por qué, a pesar de que dicho eclipse fue de tipo anular, se presentó una mayor variación de la gravedad vertical en comparación con el eclipse total del 9 de marzo de 1997 evaluado por Wang *et al.* (2000) en China (Figura 8), en el que la elevación local de los astros fue menor (21° durante la duración total). Este modelo también plantea que los valles que se registren en una estación con los astros en baja elevación estarán más separados (y, en algunos casos, incluso fuera de la sombra del eclipse visual) que los valles obtenidos cuando el Sol y la Luna están en una alta elevación local.

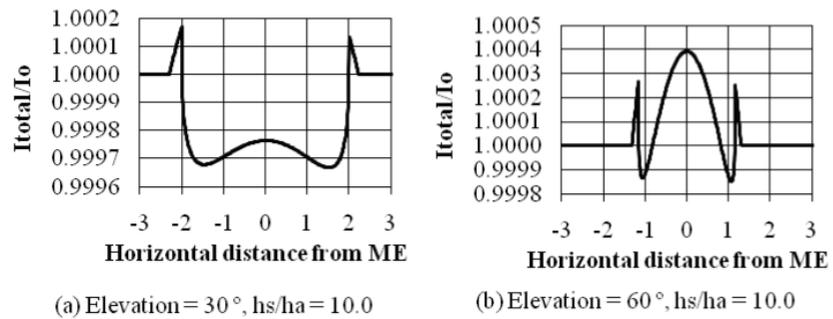


Figura 7. Flujo de gravedad total I debido al Sol después de la atenuación por la Luna para dos elevaciones lunares de acuerdo con el modelo de atenuación por la luna propuesto por Múnera (2011). Reproducido de Múnera (2011).

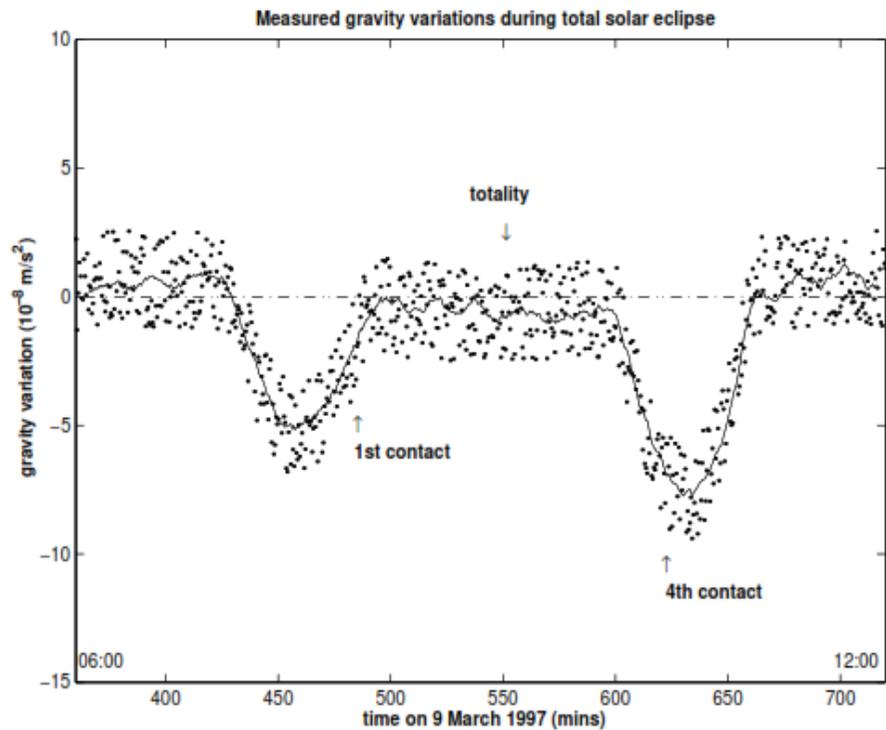


Figura 8. Variaciones de la gravedad vertical medidas por Wang *et al.* (2000) durante el eclipse solar total del 9 de marzo de 1997. Reproducido de Wang *et al.* (2000).

Conclusiones

En este estudio se midió la variación de la gravedad vertical durante el eclipse solar anular del 14 de octubre de 2023 empleando un gravímetro de alta precisión (0,001 mGal). A pesar de las limitaciones en el rango de comparación antes y después del evento, los resultados evidenciaron descensos significativos en la gravedad vertical durante los momentos cercanos al primer contacto y al último, así como una variación distintiva durante las fases principales de anularidad.

El comportamiento registrado mostró una señal con dos valles laterales y una secuencia de picos en torno al momento de máxima ocultación solar. Este patrón puede interpretarse a partir del modelo de tendadero propuesto por **Heriyanto** (2022), en el cual la Luna actúa como un amortiguador gravitacional. Complementariamente, el modelo de atenuación por la luna de **Múnera** (2011) describe cómo la dispersión del flujo gravitacional solar puede generar este tipo de comportamiento, especialmente en configuraciones con baja elevación solar, como la registrada en este evento.

Mientras que el modelo de marea terrestre para una Tierra elástica arrojó una magnitud de 0,105 mGal durante la anularidad, la señal residual observada alcanzó una amplitud total de 166,47 μ Gal (0.1665 mGal), con un valor máximo de 9,42 μ Gal durante el máximo ocultamiento. La diferencia entre las curvas de marea terrestre y la señal residual puede explicarse por condiciones astronómicas particulares y efectos locales no corregidos, como la carga oceánica y errores en la modelación mareal.

La ausencia de calibración con una estación de base impidió establecer un factor de escala específico para el sitio, lo que podría haber generado una desviación de 1–2 μ Gal, equivalente hasta a un 20 % del valor máximo registrado durante la anularidad. Aunque se mantuvo una buena estabilidad instrumental, estudios previos han demostrado que este procedimiento puede reducir errores de órdenes hasta de 10^{-4} (**Miranda *et al.***, 2013). Por otra parte, la carga oceánica, tanto mareal como no mareal, puede representar hasta un 10 % de la señal mareal en zonas costeras y, aunque su efecto disminuye en regiones continentales, no desaparece por completo (**Hinderer *et al.***, 2015; **Rajner**, 2010). Por último, si bien el diseño del gravímetro CG-5 ayuda a mitigar el impacto de la presión atmosférica, en este estudio no se realizaron mediciones paralelas de presión; sin embargo, en condiciones similares, **Miranda *et al.*** (2013) reportaron correcciones por presión de entre –8 y 2 μ Gal, lo que permite estimar un rango razonable de incertidumbre adicional asociada a este efecto.

Este trabajo aporta evidencia coherente de un posible efecto de atenuación gravitacional durante un eclipse solar respaldada por modelos teóricos y observaciones previas. Es importante destacar el estudio de **Toledo** (2020) en La Plata, Argentina, en torno a la variación de la gravedad durante el eclipse solar total del 14 de diciembre de 2020, porque los estudios sobre la variación gravitacional durante eclipses solares son escasos en Latinoamérica. El presente trabajo se constituye como el primero en la región que analiza la variación de la gravedad vertical de un eclipse solar de tipo anular.

Agradecimientos

Agradecemos a Andrés Molina por compartirnos las fotografías que tomó durante el eclipse anular del 14 de octubre de 2023 en Aipe (Huila).

Contribución de los autores

LJ: investigación preliminar sobre la variación gravitacional durante un eclipse solar, procesamiento de los datos, cálculo de los resultados y redacción de la mayor parte del documento; **BR:** investigación de la variación gravitacional en eventos de eclipse solar, evaluación de los resultados obtenidos y contribución en la redacción del documento; **LO:** responsable de la recolección de datos y participación en la revisión del manuscrito.

Conflicto de intereses

Ninguno de los autores presenta conflicto de intereses.

Referencias

- Gallucci, R.** (2019). *The Allais effect – Coincidence between Newtonian and LeSagian gravity*. <https://vixra.org/pdf/1907.0380v1.pdf>
- Heriyanto, L.** (2022). Clothesline model for total eclipses: Shielding like effect of gravity. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 8(6), 2689-2696. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i6.2006>
- Hinderer, J., Crossley, D., Warburton, R. J.** (2015). Superconducting gravimetry. In G. Schubert (Ed.), *Treatise on Geophysics*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00062-2>
- Longman, I. M.** (1959). Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and sun. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2351-2355. <https://doi.org/10.1029/JZ064i012p02351>
- Miranda, S. A., Herrada, A., Pacino, M.C.** (2013). Respuesta instrumental del gravímetro Scintrex Autograv CG-5 (s/n 40484) en modos continuo y relevamiento. Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas. *GeoActa*, 38(1), 1-14. <http://ref.scielo.org/szxdw9>
- Miranda, S. A., Ortiz, C., Herrada, A. H., Pacino, M. C.** (2015). Análisis de la marea terrestre gravimétrica en la estación San Juan (Argentina). *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21, 721-729. <https://www.redalyc.org/pdf/3939/393943285005.pdf>
- Múnera, H. A.** (2011). Gravity attenuation and consistency with observed solar eclipse gravitational anomalies. *Physics Essays*, 24(3), 428-434. <https://doi.org/10.4006/1.3615660>
- Rajner, M.** (2010). Ocean tidal loading from the gravity measurements at Jozefoslaw observatory. *Artificial Satellites*, 45(4), 175-183. <https://doi.org/10.2478/v10018-010-0016-0>
- Scintrex Limited.** (2012). *CG-5 Scintrex Autograv™ System Operation Manual*.
- Toledo, M. J.** (2020). *Variación de la gravedad durante el eclipse de sol del 14 de diciembre del 2020* [Tesis de grado, Universidad Nacional de La Plata]. SEDICI Repositorio Institucional. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/139154>
- Wang, Q., Yang, X., Wu, C., Guo, H., Liu, H., Hua, C.** (2000). Precise measurement of gravity variations during a total solar eclipse. *Physical Review D*, 62(4). <https://doi.org/10.1103/physrevd.62.041101>
- Yang, X.-S. & Wang, Q.-S.** (2002). Gravity anomaly during the Mohe total solar eclipse and new constraint on gravitational shielding parameter. *Astrophysics and Space Science*, 282(1), 245-253. <https://doi.org/10.1023/a:1021119023985>