



# Determinación de los parámetros $H$ y $G$ para 4000 asteroides del catálogo *Gaia* DR2

M. Colazo<sup>1</sup>, R. Duffard<sup>2</sup> & W. Weidmann<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

<sup>2</sup> Instituto Astrofísico de Andalucía, CSIC, España

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

<sup>4</sup> Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

Contacto / milagros.colazo@mi.unc.edu.ar

**Resumen** / La misión *Gaia* le proporcionará a la comunidad científica observaciones de alta calidad de  $\sim 300\,000$  asteroides de todas las categorías. El propósito de este trabajo es obtener un catálogo de parámetros de la función de fase ( $H$  y  $G$ ) para todos los asteroides que fueron observados por la misión *Gaia* y publicados en el catálogo DR2. Para ello, hemos introducido un algoritmo capaz de construir este catálogo. Mejoramos la determinación de los parámetros  $H$  y  $G$  de la función de fase añadiendo datos de observaciones terrestres. Comparamos nuestros resultados con los de la base de datos ASTROB y encontramos que el nivel de concordancia es satisfactorio.

**Abstract** / The *Gaia* mission will provide the scientific community with high-quality observations of  $\sim 300\,000$  asteroids of all categories. The purpose of this work is to obtain a catalog of phase function parameters ( $H$  and  $G$ ) for all the asteroids that are observed by the *Gaia* mission and which were published in the DR2 catalogue. For this purpose, we introduced an algorithm capable of building this catalog. We improved the determination of the  $H$  and  $G$  parameters of the phase function adding data from ground observations. We compared our results with those of the ASTROB database and found that the level of agreement is satisfactory.

**Keywords** / minor planets, asteroids: general – planets and satellites: fundamental parameters – surveys

## 1. Introducción

La misión *Gaia* le brindará a la comunidad científica observaciones de alta calidad de unos 300 000 asteroides de todas las categorías. La mayoría *Gaia* los son del cinturón principal, pero también se observarán pequeños asteroides del grupo NEA, troyanos de Júpiter, centauros y transneptunianos. La publicación del catálogo *Gaia data release 2* (DR2) se llevó a cabo en 2018 y consiste de 22 meses de observaciones. Esta base de datos consta de 14 099 objetos conocidos del Sistema Solar, principalmente asteroides (Hestroffer et al., 2010), basados en más de 1.5 millones de observaciones (Gaia Collaboration et al., 2018).

La comunidad científica debe estar preparada para analizar esta gran cantidad de datos que nos permitirán abarcar un conocimiento más detallado de las poblaciones de asteroides. Actualmente las propiedades físicas básicas como la masa, la densidad, las propiedades de rotación, forma y albedo aún no se conocen para la mayoría *Gaia* los\*. Para poder estimar algunas de estas cantidades podemos comenzar por el estudio de las curvas de fase de los asteroides. La curva de fase de un asteroide describe la variación de brillo del objeto a medida que varía su ángulo de fase  $\alpha$ . A partir de esta relación ángulo-brillo se pueden derivar los parámetros de magnitud absoluta  $H$  y pendiente  $G$  de la función de fase propuesta por Bowell et al. (1989). Con el paráme-

tro  $H$  seremos capaces de estimar el diámetro de los objetos. Por otro lado, se está estudiando la posibilidad de que el parámetro  $G$  sea buen estimador del albedo de los asteroides (Carbognani et al., 2019).

En este trabajo obtuvimos un catálogo de parámetros  $H$  y  $G$  utilizando curvas de fase construidas a partir de observaciones de *Gaia* publicadas en el DR2. Para esta primera etapa de la investigación, utilizamos sólo una pequeña muestra de esta base de datos: los asteroides cuyo número MPC es menor a 5000. Para mejorar la determinación de estos parámetros, construimos un segundo catálogo utilizando los datos del *Gaia* DR2 combinados con observaciones desde Tierra provenientes del ASTEROID PHOTOMETRIC CATALOG V.1 (APC) (Lagerkvist & Magnusson, 2011).

## 2. Objetivos y Métodos

En la Figura 1 podemos ver la muestra estudiada en el presente trabajo representada en el plano  $a$  vs.  $I$ . Como se mencionó en la Sección 1, hemos utilizado datos de todos los asteroides presentes en el *Gaia* DR2 cuyo número MPC es inferior a 5000.

El objetivo de este trabajo es obtener un catálogo de parámetros de la función de fase ( $H$  y  $G$ ) para todos los asteroides de nuestra muestra. Para esto, introducimos un algoritmo capaz de construir este catálogo a partir de los datos de magnitud y época UTC presentes en el *Gaia* DR2. La época UTC es útil para obtener el

\*<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/data-release-2>

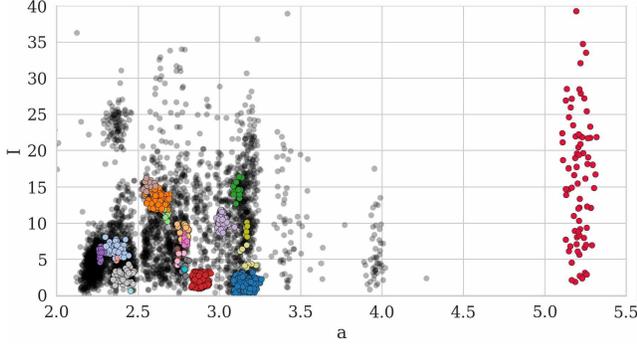


Figura 1: En negro están representados en el plano  $a$  vs.  $I$  todos los asteroides observados por *Gaia* con número MPC menor a 5000. Las familias presentes en la muestra y los asteroides troyanos están resaltados con diferentes colores.

ángulo de fase correspondiente a la observación a través de una consulta a efemérides del JPL HORIZONS\*\*. Por otra parte, la magnitud presente en el *Gaia* DR2 es la magnitud  $g$  instrumental de *Gaia*. Para poder calcular la función de fase es necesario hacer una conversión de magnitud  $g$  instrumental de *Gaia* a magnitud reducida  $V$  de Jhonson,  $V_{\text{red}}$ , definida como la magnitud del asteroide asumiendo que éste se encuentra a 1 ua del Sol y de la Tierra (en este caso, de *Gaia*), es decir, eliminando la dependencia con la distancia. El primer paso es pasar la magnitud instrumental de *Gaia* a su magnitud reducida:

$$g_{\text{red}} = g_{\text{inst}} - 5 \log_{10}(r\Delta) \quad (1)$$

donde  $r$  es la distancia gaiacéntrica y  $\Delta$  es la distancia heliocéntrica. Estos datos también se obtienen de la consulta a efemérides. El siguiente paso es hacer a transformación a la magnitud  $V$  de Jhonson. Para esto utilizamos la ecuación\*\*\*:

$$V = g_{\text{red}} + 0.012 + 0.3502(V - R) + 0.6105(V - R)^2 - 0.0852(V - R)^3 \quad (2)$$

Es importante notar que en esta ecuación polinómica, los términos  $(V - R)$  corresponden a términos de color. Para obtener este valor utilizamos la tabla de Dandy et al. (2003), quienes estimaron  $V - R$  para algunas clases espectrales. En el caso de que la clase espectral no sea conocida le asignamos un valor  $V - R$  medio y si su clase espectral no estaba presente le asignamos el valor  $V - R$  correspondiente a la clase espectral con la que comparta más características.

Una vez que obtenemos el ángulo de fase  $\alpha$  y la magnitud reducida  $V_{\text{red}}$ , nuestra implementación en lenguaje PYTHON\*\*\*\* calcula los parámetros  $H$  y  $G$  a partir del método de cuadrados mínimos lineales propuesto por Muinonen et al. (2010). La forma analítica del modelo ( $H, G$ ) es:

$$V(\alpha) = H - 2.5 \log_{10}[(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)] \quad (3)$$

donde  $H$  y  $G$  son los parámetros del modelo,  $\alpha$  es el ángulo de fase,  $V(\alpha)$  es la magnitud  $V_{\text{red}}$  reducida a la distancia unitaria,  $\Phi_1(\alpha)$  y  $\Phi_2(\alpha)$  son dos funciones básicas normalizadas a la unidad por  $\alpha=0^\circ$ .

### 3. Resultados preliminares

Obtuvimos un catálogo con la estimación de los parámetros  $H$  y  $G$  de las funciones de fase de 4158 asteroides. En la Figura 2 comparamos los valores de  $H$  obtenidos utilizando sólo datos de la misión *Gaia* con los valores publicados en la base de datos ASTROB. Notamos que el nivel de concordancia es satisfactorio. En la Figura 3, los  $H$  fueron calculados añadiendo observaciones desde Tierra (ángulos de fase pequeños). Es importante señalar la disminución de alrededor del 50% en el error cuadrático medio después de combinar los datos de la misión *Gaia* con los datos fotométricos obtenidos desde Tierra. Esto es así porque la misión *Gaia* no observa ángulos de fase menores a  $10^\circ$ , que sí son observados desde Tierra. Al combinar ambos conjuntos de observaciones se obtiene un barrido más completo de los ángulos de fase. En las Figuras 2 y 3 el color y tamaño de cada punto representa el número de observaciones que tiene cada objeto, es decir, cuanto más oscuro y grande es el punto, más observaciones tiene este asteroide. Como puede verse, en la mayoría de los casos, los puntos más grandes (más observaciones) están más cerca de la línea de coincidencia con el catálogo ASTROB, como es de esperar.

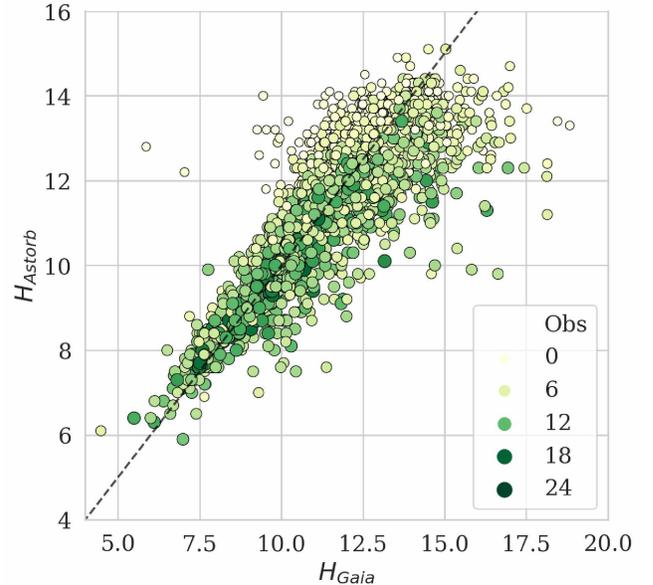


Figura 2: Comparación del  $H$  obtenido utilizando sólo datos del *Gaia* DR2 con el publicado en la base de datos ASTROB. El color y tamaño de cada punto representa el número de observaciones existentes para cada objeto.

\*\*<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

\*\*\*[ea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/](http://ea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR2/)

\*\*\*\*<https://pypi.org/project/Pyedra/>

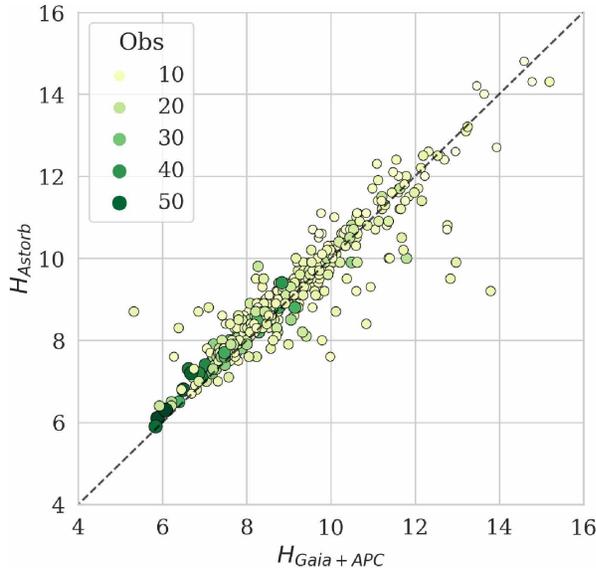


Figura 3: Comparación del  $H$  obtenido utilizando la combinación de datos del *Gaia* DR2 y del ASTEROID PHOTOMETRIC CATALOG V.1 (APC) con el publicado en la base de datos ASTROB. El color y tamaño de cada punto representa el número de observaciones existentes para cada objeto.

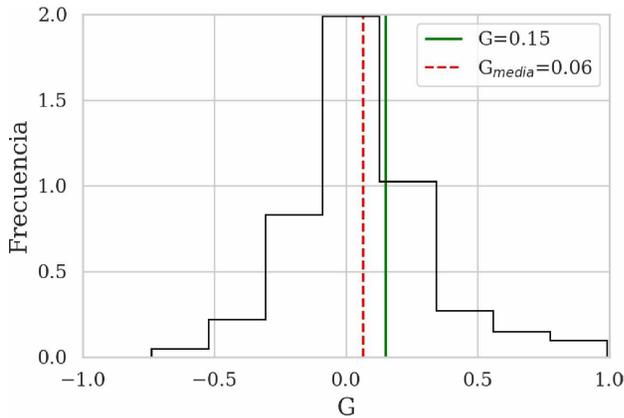


Figura 4: Histograma de los valores de  $G$  obtenidos con los datos de *Gaia* y los datos de las observaciones en Tierra. La línea continua verde marca el valor  $G = 0.15$  que se asigna a la mayoría de los asteroides. La línea rayada roja denota la media de la muestra en el intervalo  $(-1, 1)$ .

También obtuvimos el parámetro  $G$  de esos 4158 asteroides y luego mejoramos esta determinación agregando observaciones desde Tierra cuando estaban disponibles. Los valores obtenidos usando los datos de *Gaia* y los datos de Tierra se muestran en el histograma de la Figura 4. Es importante destacar, que en base a nuestra determinación, los asteroides tienen valores de  $G$  en un amplio rango, a diferencia del valor fijo  $G = 0.15$  que se asigna a la mayoría *Gaia* los según lo establecido en el MPC 17257 (diciembre de 1990).

Si observamos la Figura 5, notamos que los asteroides caracterizados por  $G > 1$  son aquellos que tienen pocas observaciones ( $< 10$ ) y que también tienen mag-

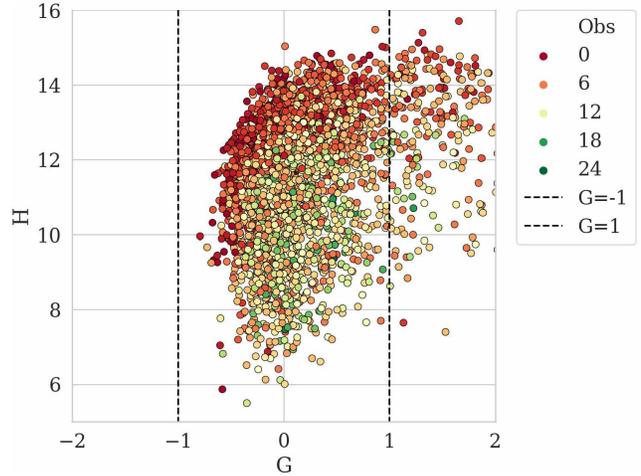


Figura 5: Gráfico  $G$  vs.  $H$ . El color de los puntos representa el número de observaciones.

nitudes relativamente altas ( $> 10$ ). Los que son más brillantes y tienen un número considerable de observaciones (puntos verdes) tienden a situarse en una línea vertical alrededor de  $G = 0$ . Es de esperar que a medida que se obtengan más observaciones, los puntos rojos que forman una especie de curva se aplanen y se vuelvan más verticales.

#### 4. Conclusión

Debemos estar preparados con herramientas informáticas para analizar y aprovechar la gran cantidad de datos que la misión *Gaia* proporcionará a la comunidad científica en el futuro catálogo DR3. Con nuestro trabajo no sólo estaremos contribuyendo con el catálogo de parámetros de la función de fase sino que también, podremos estimar los diámetros de los miles de asteroides observados usando las magnitudes absolutas  $H$  obtenidas combinadas con la información de los albedos de estos objetos. Es necesario prestar especial dedicación a la preparación de *pipelines* dedicadas a extraer toda la información posible en cada relevamiento. Continuaremos el análisis hasta que la muestra del asteroide *Gaia* DR2 esté completa y estemos listos para procesar los datos del *Gaia* DR3, próximo a ser publicado.

#### Referencias

- Bowell E., et al., 1989, R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (Eds.), *Asteroids II*, 524–556
- Carbognani A., Cellino A., Caminiti S., 2019, *Planet. Space Sci.*, 169, 15
- Dandy C.L., Fitzsimmons A., Collander-Brown S.J., 2003, *Icarus*, 163, 363
- Gaia* Collaboration, et al., 2018, *A&A*, 616, A13
- Hestroffer D., et al., 2010, *The Gaia Mission and the Asteroids*, vol. 790, 251–340
- Lagerkvist C.I., Magnusson P., 2011, *NASA Planetary Data System, EAR-A-3-DDR-APC-LIGHTCURVE-V1.1*
- Muinenen K., et al., 2010, *Icarus*, 209, 542