

# Explorando fuentes de impactos en los satélites clásicos de Urano

N.L. Rossignoli<sup>1,2</sup> & R.P. Di Sisto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

<sup>2</sup> *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

*Contacto* / nrossignoli@fcaglp.unlp.edu.ar

**Resumen** / El sistema de Urano y sus satélites presenta una configuración única en el Sistema Solar debido a la gran oblicuidad del planeta. Esto ha motivado distintos estudios que, a partir de la posible gran colisión que dio lugar a esta oblicuidad, modelan la formación de los satélites clásicos de Urano a partir de un disco de escombros remanentes de la colisión. En base a estos modelos, exploramos distintas fuentes planetocéntricas para los impactos en los satélites clásicos de Urano, considerando que nuestros resultados previos basados en fuentes heliocéntricas indican que más de una población impactora es necesaria para explicar los cráteres observados en estos satélites. En el presente trabajo, mostramos los resultados del modelo de craterización planetocéntrico en los satélites clásicos de Urano y los comparamos con los conteos observacionales actualizados publicados recientemente.

**Abstract** / The system of Uranus and its satellites presents a unique configuration in the Solar System due to its large spin-axial tilt. This has motivated multiple studies based on a possible giant impact that tilted the planet and led to the formation of its regular satellites from the resultant debris disk. Based on these models, we explore different planetocentric sources of impactors for the classical Uranian satellites, considering that our previous results based on heliocentric impactors indicate that more than one impactor population is necessary to reproduce the observed craters in these satellites. In the present work, we show the results of the planetocentric cratering model for the classical Uranian satellites and compare them to the updated observational crater counts recently published.

*Keywords* / planets and satellites: individual (Uranus) — planets and satellites: surfaces

## 1. Introducción

Modelar el proceso de craterización en el Sistema Solar exterior resulta de vital importancia para estudiar el origen y la evolución de los satélites de los planetas gigantes. En el caso de Urano, el sistema de satélites se compone de 5 satélites regulares llamados “clásicos”, 13 satélites regulares de menor tamaño que orbitan muy cerca del planeta y 9 satélites irregulares. En cuanto a las superficies de estos satélites, solo se han podido caracterizar las de los 5 satélites clásicos: Miranda, Ariel, Umbriel, Titania y Oberón, con imágenes tomadas por la sonda *Voyager 2* en 1986. Debido a su resolución variable, estas imágenes no permiten realizar un estudio completo de los cráteres de estos satélites.

Respecto a los modelos de craterización, en el sistema de Urano éstos se basan típicamente en impactores heliocéntricos provenientes de la región transneptuniana (ver Kirchoff et al., 2022). Sin embargo, nuestro modelo basado en estos impactores (Rossignoli et al., 2019, 2022) resulta insuficiente para explicar los cráteres observados en las superficies de los cinco satélites clásicos. Con esta motivación, y teniendo en cuenta la gran oblicuidad que presenta el sistema, consideramos estudios recientes (Ishizawa et al., 2019; Ida et al., 2020; Woo et al., 2022) que modelan la formación de los cinco satélites clásicos de Urano a partir de un disco de escombros remanente de una posible gran colisión que inclinó

al planeta. A partir de este disco de escombros remanente, exploramos distintas poblaciones de impactores planetocéntricos para los satélites clásicos de Urano, teniendo en cuenta las prescripciones presentadas en Ida et al. (2020) y Woo et al. (2022). Luego, comparamos nuestros resultados con los conteos de cráteres publicados en Kirchoff et al. (2022), generados a partir de una recalibración de las imágenes tomadas por la *Voyager 2*.

## 2. Método

Recientemente, han surgido varios trabajos que logran reproducir la arquitectura del sistema de satélites clásicos de Urano a partir de un disco de escombros generado en la posible gran colisión. Basándonos en los modelos más exitosos hasta la fecha, utilizamos las prescripciones presentadas en los trabajos de Ida et al. (2020) y Woo et al. (2022) para construir posibles poblaciones planetocéntricas para el sistema de Urano. Estos trabajos tienen en cuenta que la masa de los satélites clásicos aumenta con la distancia al planeta, entonces para nuestra simulación proponemos 4 discos de 500 partículas cada uno con distribuciones  $N(a) \propto a^n$ , donde  $a$  es el semieje mayor de las partículas y  $n$  toma valores de  $n = 1/2, 1, 3/2$  y  $5/2$  para los Discos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Además, luego de la formación de los satélites contemplamos que el disco de escombros está excitado, por lo que modelamos los parámetros orbitales

de las partículas con semiejes mayores entre  $3 R_U \leq a \leq 30 R_U$ , donde  $R_U$  es el radio de Urano, excentricidades entre  $0 \leq e \leq 0.25$  e inclinaciones entre  $0^\circ \leq i \leq 15^\circ$  respecto al eje positivo de spin de Urano. El resto de los elementos orbitales toman valores aleatorios. Luego, realizamos simulaciones numéricas de la evolución dinámica de cada disco con el código EVORB (Fernández et al., 2002). Consideramos un tiempo de integración de 10 millones de años y tomamos como cuerpos masivos a Urano y los cinco satélites clásicos en su configuración actual. Al finalizar la simulación, obtuvimos la probabilidad de colisión y la velocidad media de impacto en cada satélite (ver Tabla 1). Con estos resultados, construimos una distribución de tamaños acumulada (CSD) de nuestros impactores planetocéntricos, calibrándola con los conteos de cráteres observados en Oberón (Kirchoff et al., 2022), uno de los satélites más craterizados de Urano. La CSD de estos impactores está dada por:

$$N(> d) = C \left( \frac{1 \text{ km}}{d} \right)^q \quad \text{para} \quad d \gtrsim 1 \text{ km}, \quad (1)$$

donde  $d$  es el diámetro del impactor,  $q=2$  y  $C$  depende de la distribución de partículas en el disco y varía entre  $C = 44655$  para el Disco 1 y  $C = 27119$  para el Disco 4. Esta CSD nos permite modelar la distribución de cráteres planetocéntrica en los cinco satélites clásicos para luego comparar nuestros resultados con los conteos observacionales (Kirchoff et al., 2022).

Para obtener el diámetro del cráter transitorio  $D_t$  en función del diámetro del impactor  $d$ , utilizamos la ley de escala para impactos en régimen gravitatorio y superficies e impactores de hielo (Holsapple & Housen, 2007):

$$D_t = K_1 \left( \frac{g d}{2 v_i^2} \right)^{-\frac{\mu}{2+\mu}} d, \quad (2)$$

donde  $g$  es la gravedad del satélite,  $v_i$  la velocidad media de impacto sobre el satélite,  $\mu=0.38$  y  $K_1=1.67$ . El diámetro final del cráter se obtiene adaptando los resultados a las prescripciones para cráteres complejos.

### 3. Resultados y discusión

En esta sección presentamos los resultados del modelo de craterización planetocéntrico en los satélites clásicos de Urano, para los casos límites del Disco 1 y el Disco 4 y considerando que los resultados correspondientes a los Discos 2 y 3 quedan contenidos entre éstos.

Tabla 1: Radio medio  $R_s$  y semieje mayor  $a$  del satélite en km, velocidad media de colisión  $v_i$  en  $\text{km s}^{-1}$  y probabilidad  $p$  de colisión para los Discos 1 y 4.

Satélite	$R_s$	$a$	$v_i$ [D1]	$p$ [D1]	$v_i$ [D4]	$p$ [D4]
Miranda	235.8	129 900	1.59	0.03	1.83	0.01
Ariel	578.9	190 900	1.38	0.11	1.55	0.05
Umbriel	584.7	266 000	1.23	0.14	1.33	0.1
Titania	788.9	436 300	1.20	0.31	1.16	0.35
Oberón	761.4	583 500	1.03	0.32	1.05	0.41

En la Tabla 1 se muestran las características distintivas de los cinco satélites clásicos y los resultados generales de nuestro modelo planetocéntrico para los Discos

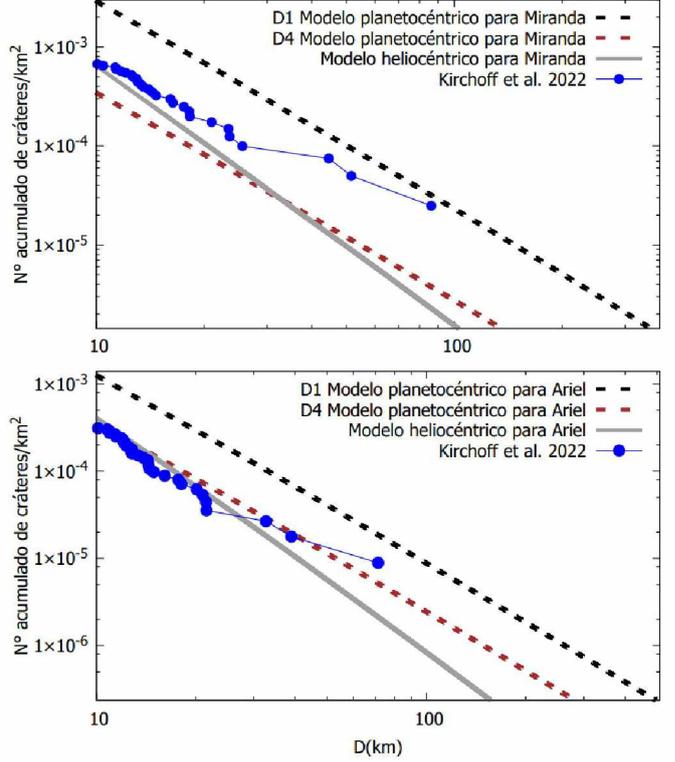


Figura 1: Número acumulado de cráteres por kilómetro cuadrado en Miranda (*arriba*) y Ariel (*abajo*) en función del diámetro del cráter. Las líneas punteadas representan los resultados para el modelo planetocéntrico de los Discos 1 y 4. La línea sólida gris corresponde al modelo heliocéntrico y los puntos en color azul indican los conteos observacionales (Kirchoff et al., 2022). Adaptada de Rossignoli & Di Sisto (2022).

1 y 4. Como consecuencia de la diferencia de índices  $n$  en la distribución de partículas  $N(a)$  descrita en la Sec. 2, la probabilidad de impacto asociada al Disco 4 decae más rápidamente que la asociada al Disco 1 al disminuir la distancia a Urano. En las Figs. 1 y 2 se muestra el número acumulado de cráteres por kilómetro cuadrado en función del diámetro del cráter para los Discos 1 y 4 y para el modelo heliocéntrico que motivó el presente estudio, junto con las observaciones correspondientes a los terrenos craterizados de los satélites (Kirchoff et al., 2022). En el caso de Miranda y Ariel (Fig. 1), que orbitan más cerca de Urano, vemos que nuestro modelo planetocéntrico genera una sobreestimación de cráteres con el Disco 1, mientras que los resultados para el Disco 4 subestiman el número de cráteres observados en el caso de Miranda. Como las superficies de Ariel y Miranda presentan evidencias de procesos de renovación de superficie que pueden borrar cráteres y nuestro modelo no contempla estos efectos, es esperable que nuestros resultados sobreestimen el número de cráteres. Por otra parte, nuestro modelo heliocéntrico genera una leve subestimación de cráteres en el caso de Miranda. En los casos de Umbriel, Titania y Oberón (Fig. 2), nuestro modelo planetocéntrico logra un mejor acuerdo con las observaciones, sobre todo para el Disco 1. Teniendo en cuenta

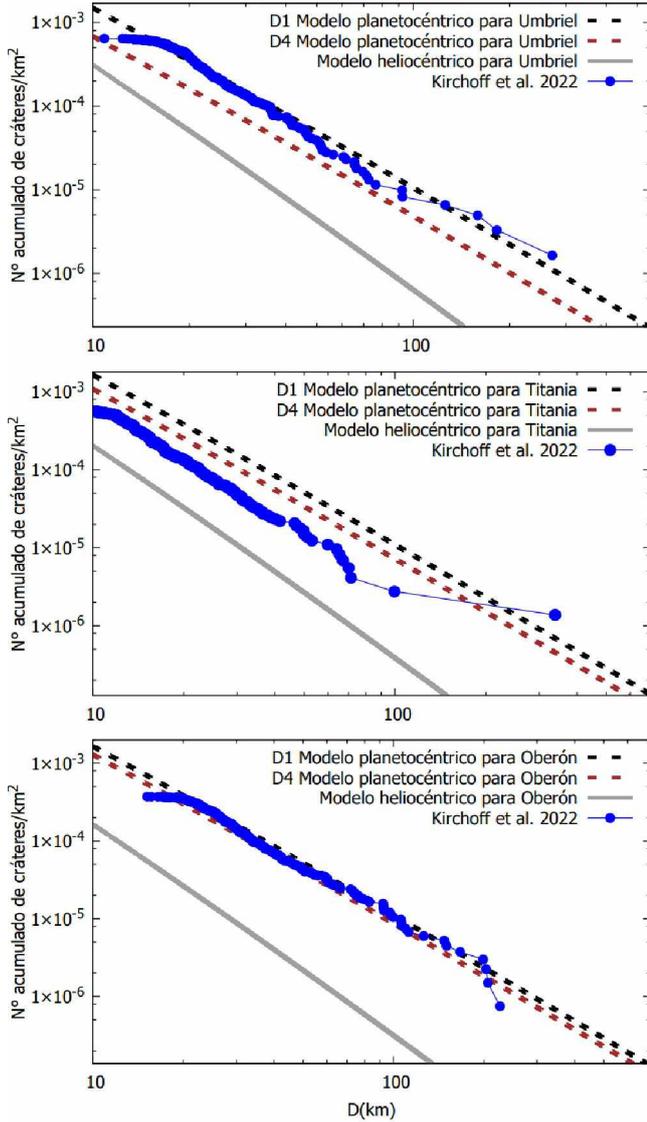


Figura 2: Número acumulado de cráteres por kilómetro cuadrado en Umbriel (*arriba*), Titania (*centro*) y Oberón (*abajo*) en función del diámetro del cráter. Las líneas punteadas representan los resultados para el modelo planetocéntrico de los Discos 1 y 4. La línea sólida gris corresponde al modelo heliocéntrico y los puntos en color azul indican los conteos observacionales (Kirchoff et al., 2022). Adaptada de Rossignoli & Di Sisto (2022).

que la superficie de Titania exhibe ciertos indicios de renovación de superficie, es esperable que nuestro modelo sobreestime el número de cráteres observables. Nuestro modelo heliocéntrico para estos tres satélites muestra una fuerte subestimación del número de cráteres.

En síntesis, nuestros resultados indican que es posible reproducir los conteos de cráteres observados actua-

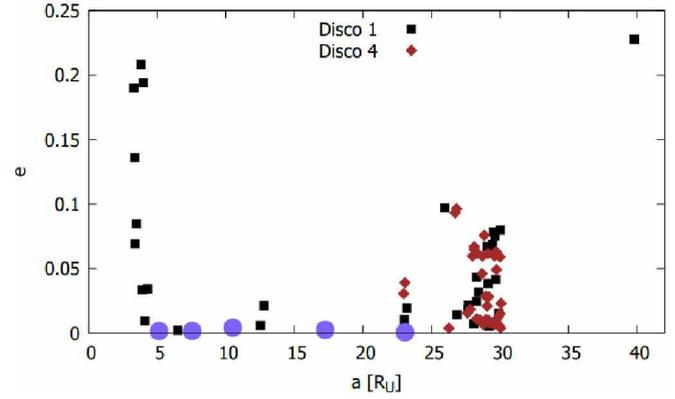


Figura 3: Excentricidad en función del semieje mayor expresado en radios de Urano de las partículas remanentes en la simulación al cabo de 10 millones de años, para los Discos 1 y 4. Los cinco satélites clásicos están representados por los círculos celestes.

lizados (Kirchoff et al., 2022) a partir de una fuente de impactores planetocéntrica generada en el posible gran impacto que inclinó Urano. En particular, de los cuatro posibles discos explorados en el presente trabajo, encontramos que aquellos con un menor índice  $n$  en la distribución de partículas resultan en distribuciones de cráteres que tienen un mejor acuerdo con las observaciones.

Por otra parte, notamos que al correr nuestras simulaciones por 10 millones de años, algunas partículas sobreviven con órbitas interiores a la órbita de Miranda o exteriores a la órbita de Oberón (Fig. 3). Incluso ciertas partículas remanentes comparten órbita con Oberón. Respecto a los 13 satélites regulares más pequeños, esto podría indicar que quizás su origen también esté relacionado al posible gran impacto de Urano. Resulta entonces interesante continuar con el estudio de este sistema, en vistas de que existe la posibilidad de volver a explorarlo con una nueva misión en 2030.

## Referencias

Fernández J.A., Gallardo T., Brunini A., 2002, *Icarus*, 159, 358  
 Holsapple K.A., Housen K.R., 2007, *Icarus*, 187  
 Ida S., et al., 2020, *Nat. Astron.*, 4  
 Ishizawa Y., Sasaki T., Hosono N., 2019, *ApJ*, 885, 132  
 Kirchoff M.R., et al., 2022, *PSJ*, 3  
 Rossignoli N.L., Di Sisto R.P., 2022, *LPI Contributions, LPI Contributions*, vol. 2702, 2017  
 Rossignoli N.L., Di Sisto R.P., Parisi M.G., 2022, *A&A*, 660, A127  
 Rossignoli N.L., et al., 2019, *A&A*, 627, A12  
 Woo J.M.Y., et al., 2022, *Icarus*, 375