



Craterización en Titán: efectos atmosféricos y edad de superficie

N.L. Rossignoli^{1,2}, R.P. Di Sisto^{1,2} & M.G. Parisi^{1,3}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

² Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

³ Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA-UNLP, Argentina

Contacto / nrossignoli@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / Titán es el único satélite del sistema solar donde se ha detectado una atmósfera densa y donde la presencia de líquidos sobre su superficie ha sido confirmada en forma de mares, lagos y ríos. Los datos recolectados por la misión *Cassini-Huygens* han permitido descubrir numerosas características intrigantes de este satélite, entre ellas un ciclo hidrológico basado en metano y una superficie sujeta a diferentes procesos que la renuevan. El análisis de las imágenes de radar muestra escasos cráteres de impacto con elevados niveles de erosión, posiblemente debido a rellenado eólico y erosión fluvial. La combinación de efectos atmosféricos y procesos de erosión provee un escenario único donde testear modelos teóricos de craterización y cálculo de edades de superficie. En este trabajo utilizamos un modelo teórico desarrollado y aplicado previamente para estudiar las colisiones de los objetos Centauros sobre el sistema de satélites de Saturno e incorporamos efectos atmosféricos para obtener la distribución asociada de cráteres en Titán. Luego comparamos nuestros resultados con las observaciones disponibles y obtenemos así restricciones sobre la edad de la superficie para los distintos tamaños de cráteres.

Abstract / Titan is the only satellite in the solar system where a dense atmosphere has been detected and the presence of liquids confirmed in seas, lakes and rivers. Data collected by the *Cassini-Huygens* mission allowed for the discovery of many intriguing features of this satellite, including its hydrologic cycle based on methane and a surface subject to renewal processes. The analysis of radar images revealed a scarcity of impact craters showing high levels of erosion, possibly due to eolian infilling and fluvial erosion. The combination of atmospheric effects and erosion processes poses a unique environment where to test theoretical cratering and surface chronology models. In this work we use a model previously developed to study impacts on the saturnian satellites by Centaurs and we introduce atmospheric effects to obtain the resulting crater distribution on Titan. Then we compare our results with the available observations and obtain constraints on the surface age for different crater sizes.

Keywords / Kuiper belt: general — planets and satellites: individual (Titan) — planets and satellites: surfaces

1. Introducción

Titán es el satélite más grande de Saturno y el único en todo el Sistema Solar que presenta una atmósfera densa. Previo a que la misión *Cassini-Huygens* observara en detalle la superficie de Titán, su distribución de cráteres era desconocida pero se estimaba que sería similar a la de otros satélites de Saturno y que consistiría en un número elevado de cráteres. Sin embargo, las imágenes de radar obtenidas por *Cassini* revelaron un escaso número de cráteres de impacto que presentan elevados niveles de erosión (Lopes et al., 2019). En este trabajo calculamos la craterización en Titán utilizando como base un modelo teórico desarrollado y aplicado previamente a los satélites medianos y pequeños de Saturno (Di Sisto & Brunini, 2011; Di Sisto & Zanardi, 2013; Rossignoli et al., 2019). Luego, comparamos nuestros resultados con los conteos de cráteres obtenidos a partir de imágenes de radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) de la nave *Cassini* (Hedgepeth et al., 2020). Esta comparación nos permite calcular la edad de la superficie de Titán en función del tamaño de cada cráter observado y restringir así las escalas de tiempo de renovación de su superficie.

2. Método

Para estudiar el proceso de craterización en Titán nos basamos en el modelo desarrollado en trabajos previos (Di Sisto & Brunini, 2011; Di Sisto & Zanardi, 2013; Rossignoli et al., 2020), donde se considera como principales impactores de los satélites de Saturno a los Centauros. Estos objetos heliocéntricos se originan en el Disco Dispersado dentro de la Región Transneptuniana y al migrar hacia adentro del Sistema Solar pueden colisionar tanto con los planetas como con sus satélites. Para caracterizar esta población de impactores se utiliza la siguiente distribución acumulada de tamaños:

$$\begin{aligned} N(> d) &= C_0 d^{-2.5} & \text{para } d \leq 100 \text{ km,} \\ N(> d) &= C_1 d^{-3.7} & \text{para } d > 100 \text{ km,} \end{aligned} \quad (1)$$

donde $C_0=3.5 \times 10^{10}$ y $C_1=3.5 \times 10^{12.4}$.

El número acumulado de colisiones sobre Titán a lo largo de toda la edad del Sistema Solar se obtiene a partir de los resultados de la simulación numérica presentados en Di Sisto & Rossignoli (2020). Esta simulación actualiza los resultados obtenidos en Di Sisto & Brunini

(2007), ya que se basa en el número actual de objetos detectados que son fuente de Centauros. Considerando el Sistema Solar en su configuración actual, el número acumulado de colisiones sobre Titán está dado por:

$$N_c(> d) = \frac{v_i R_G^2}{v(R_H) R_H^2} 8.5 N(> d), \quad (2)$$

donde v_i es la velocidad de colisión relativa en Titán, $v(R_H)$ es la velocidad media de encuentro de los Centauros al entrar a la esfera de Hill de Saturno y R_G es el radio gravitacional de Titán dado por: $R_G = R_{Titan}(1 + (v_{esc}/v(R_H))^2)^{1/2}$.

Luego, el diámetro transitorio D_t de un cráter generado por un impactor de diámetro d , está modelado por la ley de escala (Holsapple & Housen, 2007):

$$D_t = K_1 d \left[\left(\frac{gd}{2v_i^2} \right) \left(\frac{\rho_i}{\rho} \right)^{2\nu/\mu} + K_2 \left(\frac{Y}{\rho_i v_i^2} \right)^{1+\mu/2} \left(\frac{\rho_i}{\rho} \right)^{\nu(2+\mu)/\mu} \right]^{-\mu/(2+\mu)} \quad (3)$$

donde $\mu = 0.38$, $\nu = 0.397$, $K_1 = 1.67$, $K_2 = 0.8$ e $Y = 10^7 \text{ dyn cm}^{-2}$ (Litwin et al., 2012; Di Sisto & Zanardi, 2013). El primer término de esta ecuación representa la importancia de la gravedad del blanco en el evento de craterización (régimen gravitatorio), mientras que el segundo término representa la importancia de la cohesión del blanco (régimen de cohesión). Debido a su tamaño, en Titán la mayoría de los cráteres se forman en el régimen gravitatorio. El diámetro final del cráter D se obtiene adaptando los resultados para cráteres complejos (Di Sisto & Zanardi, 2013), cuyos picos centrales y paredes colapsadas en terrazas se forman debido a la acción de la gravedad en la etapa final del evento de craterización.

Con el objetivo de incluir los principales efectos atmosféricos en el proceso de craterización, utilizamos el perfil de densidad atmosférico obtenido por la sonda *Huygens* al descender sobre la superficie de Titán (Fulchignoni et al., 2005). Consideramos el efecto de desaceleración del impactor, dado por (Engel et al., 1995):

$$m\dot{v} = -\frac{1}{2}C_D A \rho(z)v^2 + g(z)m \sin \alpha, \quad (4)$$

donde m , v y $A = \pi d^2/4$ son la masa del impactor, su velocidad y su sección eficaz respectivamente, $\rho(z)$ es la densidad atmosférica, $g(z)$ es la aceleración gravitatoria de Titán, α el ángulo de impacto y $C_D=0.64$ es el coeficiente de desaceleración (Korycansky & Zahnle, 2005). Consideramos como el ángulo de impacto más probable $\alpha=45^\circ$ con respecto al horizonte.

Para incluir el efecto de ablación del impactor, la variación de masa está modelada por (Korycansky & Zahnle, 2005):

$$\dot{m} = -C_A \rho(z) A v, \quad (5)$$

donde $C_A=0.71$ es el coeficiente de ablación.

La dependencia temporal de la craterización puede modelarse mediante una función logarítmica (Di Sisto & Zanardi, 2016), lo que permite calcular la cronología o edad de la superficie de Titán τ_s utilizando la expresión:

$$\tau_s(> D) = t_f (1 - e^{-N_o(>D)/(aN_o(>D))}), \quad (6)$$

donde $a=0.204119$, $t_f = 4.5 \times 10^9$ años es la edad del sistema solar, $N_o(>D)$ es el número acumulado de cráteres observado en Titán y $N_c(>D)$ el número acumulado de cráteres teórico obtenido con nuestro modelo.

3. Resultados

De acuerdo al modelo descrito, calculamos la craterización en Titán debido a objetos Centauros a lo largo de la edad del sistema solar. Al incluir los efectos atmosféricos presentados en nuestro modelo de craterización, los resultados muestran que hay una clara dependencia entre el tamaño del impactor y la desaceleración y ablación que experimenta a medida que atraviesa la atmósfera. En la Fig. 1 podemos ver ambos efectos atmosféricos combinados sobre distintos tamaños de impactores, para una velocidad de entrada a la atmósfera común a todos los proyectiles de 10.39 km s^{-1} y un impacto a $\alpha=90^\circ$. Para un objeto con diámetro $d=10 \text{ km}$, vemos que su velocidad final al llegar a la superficie es casi indistinguible de su velocidad de entrada a la atmósfera, mientras que para impactores con $d \lesssim 10 \text{ m}$ el efecto atmosférico logra la desaceleración total del objeto y por lo tanto en nuestro modelo estos impactores no producen cráteres. En la Fig. 1 se puede ver además, que el efecto atmosférico se intensifica a medida que el impactor se acerca a la superficie de Titán, donde la atmósfera alcanza una densidad equivalente a cuatro veces la densidad atmosférica en la superficie terrestre.

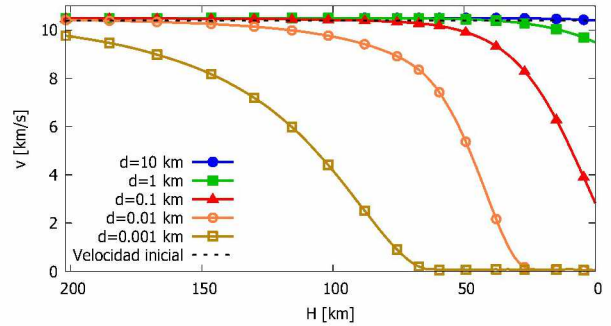


Figura 1: Velocidad del impactor en función de la altura respecto a la superficie de Titán, para impactos a $\alpha=90^\circ$ y diámetros del impactor $d = 10, 1, 10^{-1}, 10^{-2}$ y 10^{-3} km . La línea rayada negra indica la velocidad de entrada a la atmósfera, común a todos los proyectiles, de 10.39 km s^{-1} .

En la Tabla 1 se muestran los diámetros de transición y los resultados para el caso del impactor más grande en el modelo que incluye efectos atmosféricos. De acuerdo a estos resultados, la mayoría de los cráteres obtenidos en nuestro modelo serán producidos en un evento de craterización bajo el régimen gravitatorio y serán complejos.

Tabla 1: Diámetro límite entre el régimen de cohesión y el gravitatorio D_{li} ; diámetro de transición D_{tr} entre cráteres simples y complejos; diámetro del impactor de mayor tamaño d_m , diámetro del cráter que genera D_m y su velocidad de colisión v_i para el ángulo de impacto más probable ($\alpha=45^\circ$).

D_{li} [km]	D_{tr} [km]	d_m [km]	D_m [km]	v_i [km s $^{-1}$]
0.97	2.11	19.35	182.3	7.39

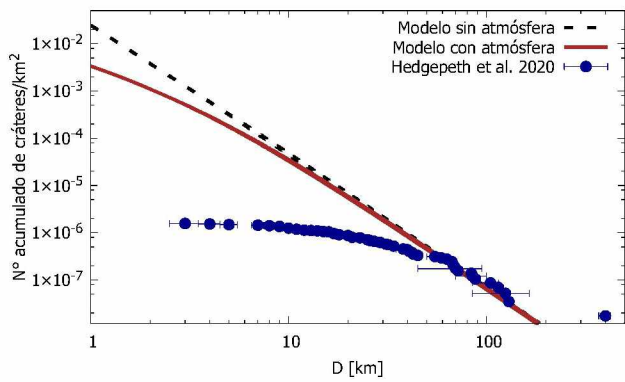


Figura 2: Número acumulado de cráteres por kilómetro cuadrado en función del diámetro del cráter. La línea rayada negra representa los resultados para nuestro modelo sin atmósfera, mientras que la curva continua bordó corresponde a los resultados del modelo considerando los efectos atmosféricos. Los círculos azules corresponden al conteo de cráteres presentado en Hedgepeth (2020).

En la Fig. 2 se muestra el número acumulado observado de cráteres por kilómetro cuadrado en función del diámetro del cráter (Hedgepeth et al., 2020), junto con nuestros resultados para el modelo que no tiene en cuenta efectos atmosféricos y el que incluye los efectos atmosféricos mencionados anteriormente.

Nuestros resultados muestran que el número acumulado teórico de cráteres tiene un excelente acuerdo con aquellos cráteres observados con $D \gtrsim 50$ km, mientras que para cráteres de menor tamaño se sobreestima el número de cráteres. Esta diferencia podría ser generada por diversos factores, entre ellos otros efectos atmosféricos no considerados en este modelo, como el de fragmentación o deformación (*pancaking*) del impactor. Modelos alternativos como el de Artemieva & Lunine (2003) concluyen que es esperable que impactores con diámetros $d < 1$ km sufran sucesivas fragmentaciones o se vean completamente desacelerados a medida que atraviesan la atmósfera. Por esta misma razón, nuestros resultados para cráteres con diámetros $D \lesssim 10$ km deberían ser considerados límites superiores de la distribución de cráteres esperada, ya que impactores con diámetros $d \lesssim 1$ km son afectados más fuertemente por efectos atmosféricos no considerados por nuestro modelo y/o distintos efectos de erosión. De hecho, los cráteres de impacto observados en Titán evidencian diferentes grados de erosión, siendo el rellenado eólico y la erosión fluvial los procesos dominantes (Neish et al., 2016; Hedgepeth et al., 2020). Este tipo de erosión prolongada en grandes escalas de tiempo podría contribuir a reducir aún más el número de cráteres pequeños detectables.

Respecto a la cronología de la superficie de Titán, nuestros resultados (Fig. 3) muestran que los cráteres con $D > 50$ km podrían ser tan antiguos como el sistema solar, lo cual podría indicar que Titán es un objeto primordial. Por otro lado, aquellos cráteres con $D < 10$ km muestran edades en el rango $\approx 66 - 700$ millones de años, indicando que la superfi-

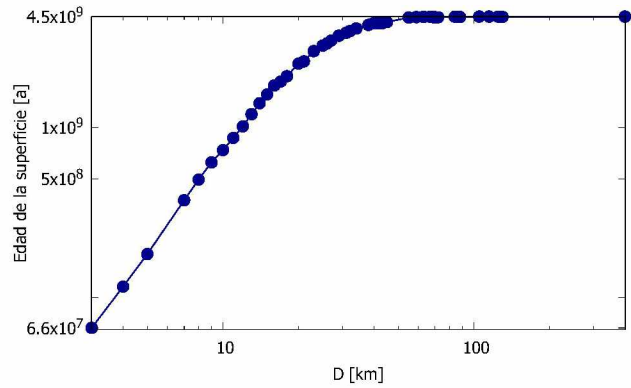


Figura 3: Edad de la superficie de Titán en función del diámetro de cada cráter observado. Los círculos azules corresponden al conteo de cráteres presentado en Hedgepeth (2020).

cie se renueva en escalas relativamente cortas de tiempo.

4. Conclusiones

Los resultados de nuestro modelo sugieren que al incluir los efectos atmosféricos mencionados, la distribución asociada de cráteres es más consistente con las observaciones, sobre todo para aquellos cráteres con $D > 50$ km, que son menos afectados por procesos erosivos o efectos atmosféricos no considerados en este estudio. Para los cráteres de menor tamaño, nuestro modelo sobreestima el número de cráteres aún cuando se tienen en cuenta efectos atmosféricos, por lo cual concluimos que estos resultados deben considerarse límites superiores de la distribución esperada de cráteres en Titán. Respecto a la cronología de superficie, nuestro modelo muestra que los procesos de renovación de superficie ocurren en escalas de tiempo cortas, lo que podría contribuir a borrar los vestigios de los cráteres pequeños.

Referencias

- Artemieva N., Lunine J., 2003, *Icarus*, 164, 471
- Di Sisto R.P., Brunini A., 2007, *Icarus*, 190, 224
- Di Sisto R.P., Brunini A., 2011, *A&A*, 534, A68
- Di Sisto R.P., Rossignoli N.L., 2020, *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 132, 36
- Di Sisto R.P., Zanardi M., 2013, *A&A*, 553, A79
- Di Sisto R.P., Zanardi M., 2016, *Icarus*, 264, 90
- Engel S., Lunine J.L., Hartmann W.K., 1995, *Planet. Space Sci.*, 43, 1059
- Fulchignoni M., et al., 2005, *Nature*, 438, 785
- Hedgepeth J.E., et al., 2020, *Icarus*, 113664
- Holsapple K.A., Housen K.R., 2007, *Icarus*, 187, 345
- Korycansky D.G., Zahnle K.J., 2005, *Planet. Space Sci.*, 53, 695
- Litwin K.L., et al., 2012, *J. Geophys. Res.*, 117, E08013
- Lopes R.M.C., et al., 2019, *SSRv*, 215, 33
- Neish C.D., et al., 2016, *Icarus*, 270, 114
- Rossignoli N.L., Di Sisto R.P., Parisi M.G., 2020, *LPI Contributions*, 2251, 2024
- Rossignoli N.L., et al., 2019, *A&A*, 627, A12