

## Revisión de la edad de la Planicie de Ophir y sus estructuras

### Review of the age of the Ophir Planum and its structures

LUIS VARGAS<sup>1</sup> | HEYDI MARTÍNEZ<sup>2</sup>

*Recibido: 25 de julio de 2017/ Aceptado: 25 de octubre de 2018*

La acumulación de cráteres en superficies de cuerpos planetarios incrementa a través del tiempo, mientras el tamaño de los diámetros disminuye. Modelos cronológicos lunares han sido creados utilizando muestras datadas con radiometría y conteo de cráteres. Dichos modelos se han ajustado para otros cuerpos terrestres como ser Marte. Se realizó el conteo de cráteres para la planicie de OPHIR localizada en la provincia de Tharsis, Marte haciendo uso de nuevas herramientas o programas como CraterTools y CraterStats. Los resultados fueron analizados utilizando los modelos estadísticos cronológicos y se determinó que la edad de la planicie de OPHIR es  $\sim 3.70$  Ga con una baja incertidumbre absoluta.

Accumulation of craters on surfaces of planetary bodies increases over time, while the size of the diameters decreases. Lunar chronological models have been created using samples dated with radiometry and crater counting. These models have been adjusted for other terrestrial bodies such as Mars. The crater count for OPHIR Planum located in the province of Tharsis, Mars was made using new tools or programs such as CraterTools and CraterStats. The results were analyzed using the chronological statistical models and it was determined that the age of the OPHIR Planum is  $\sim 3.70$  Ga with a low absolute uncertainty.

#### PALABRAS CLAVES

Reconteo, Cráteres, Ophir

#### KEYWORDS

Crater, Counts, Ophir

#### PACS

96.30.Gc

<sup>1</sup>Luis Vargas, Escuela de Física, Universidad Nacional Autónoma de Honduras email: luisfisicaunah@gmail.com

<sup>2</sup>Heydi Martínez, Escuela de Física, Universidad Nacional Autónoma de Honduras email: heydi.martinez@unah.edu.hn

## I | INTRODUCCIÓN

La estimación de la edad de cuerpos planetarios como Marte ha sido posible por medio de mediciones indirectas como el recuento de cráteres. Este es un método que estima densidades de cráteres localizados en una superficie o área específica para determinar la edad de la superficie Baldwin (1971); Hartmann (1972); Neukum (1971, 1977, 1983); Neukum y Wise (1976); Soderblom, Condit, West, Herman, y Kreidler (1974). Este estudio muestra los beneficios de usar nuevas herramientas para realizar el recuento de cráteres como con CraterTools y CraterStats. El estudio se realizó para un sector de la planicie de Ophir y las estructuras que se encuentran en la misma.

\* Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial 4.0 Internacional © ⓘ

\* This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. © ⓘ

## II | ORIGEN DE LOS CRÁTERES

Los cráteres son depresiones circulares en la superficie de planetas, lunas y otros cuerpos sólidos en el sistema solar debidas al impacto de proyectiles. Éstos se clasifican de acuerdo a su localización específica en el espacio, conocida como cinturones. Proyectiles que han alcanzado cuerpos planetarios pueden provenir de: 1. asteroides desviados del cinturón principal, 2. familia de cometas de Júpiter desviados del cinturón de Kuiper y 3. cometas de largo período desviados de la nube de Oort. Morbidelli, Bottke, Froeschlé, y Michel (2002); Weissman, Bottke Jr., y Levison (2002). Cada uno tiene la posibilidad de afectar a un único cuerpo planetario. Con el tiempo estos proyectiles impactaron cuerpos planetarios formando los cráteres. Aunque se considera que la mayoría de los cráteres son el resultado de asteroides.

Los cráteres se acumulan con el tiempo formando densidades de cráteres, una vez que éstos se han clasificado en áreas específicas. Una densidad de cráteres se define como el número de cráteres de impactos de cierto rango de diámetros localizados en un área delimitada Hartmann y Neukum (2001); Ivanov (2001); Ivanov, Neukum, Bottke, y Hartmann (2002); Neukum, Ivanov, y Hartmann (2001).

## III | METODOLOGÍA

### 1 | CraterTools y CraterStats

El recuento de cráteres es un análisis estadístico utilizado para estimar la edad de la superficie de cuerpos planetarios (e.g. la Luna, y Marte). El análisis requiere el uso de imágenes satelitales. Para este análisis se asume que la superficie no tiene cráteres en su estado inicial, y que estos se acumulan a través del tiempo. El análisis considera que el tamaño del cráter está asociado al tiempo en que éste se formó por lo que cráteres de mayor tamaño se consideran más antiguos Baldwin (1971); Hartmann (1973); Soderblom y cols. (1974); Öpik (1960).

Diversas técnicas han sido utilizadas para determinar las densidades de cráteres Crater Analysis Techniques Working Group (1979); Hartmann y Neukum (2001); Ivanov (2001); Neukum (1983) aunque no existe una norma estandarizada debido a varios factores que causan distorsión, por ejemplo: la proyección de la imagen y el ángulo de impacto.

CraterTools es un programa que determina el diámetro de los cráteres de forma independiente a la proyección del mapa Kneissl, van Gasselt, y Neukum (2011). Estas mediciones son analizadas con CraterStats, un programa que estima las edades analizando diferentes metodologías estadísticas Kneissl y cols. (2011). El programa fue diseñado para funcionar con cualquier superficie planetaria que ya posea un modelo estadístico cronológico registrado (e.g. la Luna). El modelo cronológico de la Luna proviene del recuento de cráteres asociados con muestras Lunares datadas por medio de radiometría Basaltic Volcanism Study Project (1981).

Los modelos utilizados se calibran haciendo uso de parámetros dinámicos, geométricos, y ambientales Werner, Ivanov, y Neukum (2005), utilizando criterios e información que estaba disponible en el momento en que el programa fue publicado.

Un modelo cronológico para Marte se puede generar debido a su cercanía con la Luna, asumiendo que su formación ocurrió simultáneamente Ivanov, Neukum, y Wagner (2001). Hasta el día de hoy, hay tres sistemas cronológicos disponibles para Marte. Estos sistemas cronológicos se estructuraron a partir de teorías y hallazgos de autores como Ivanov (2001) 1, Neukum y Ivanov (2001) y Hartmann (2004). Estos sistemas son el resultado de diferentes ajustes publicados donde aplicaron varios criterios para crear el modelo que mejor se ajuste.

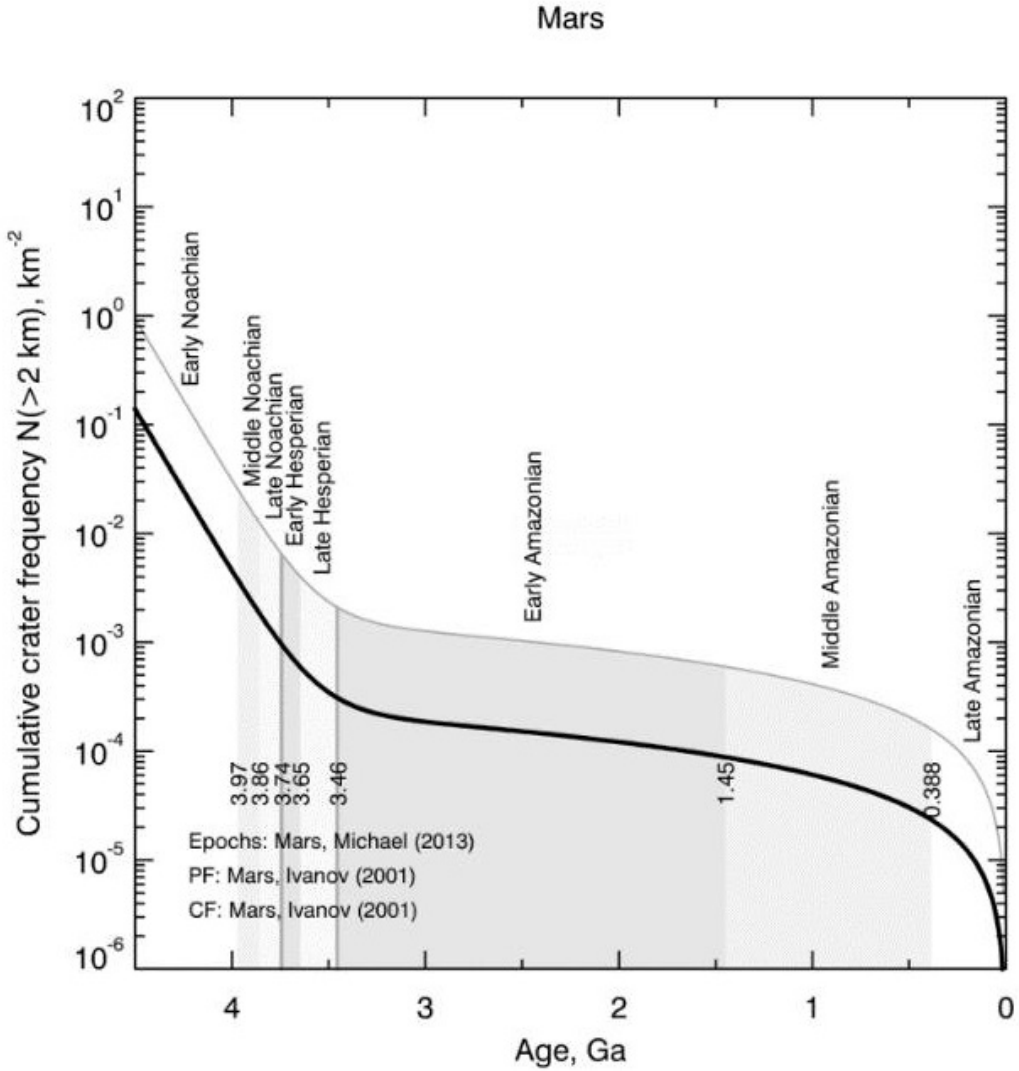


Figura 1: Modelo cronológico de Marte Michael (2013). Las bandas se ajustan a diferentes períodos de la línea de tiempo geológica de Marte.

**2 | Modelos cronológicos**

Los sistemas cronológicos funcionan bajo dos funciones importantes, la función de producción y la función cronológica (i.e. modelo cronológico). La función de producción establece una relación entre el diámetro del cráter y la cantidad de cráteres que se encuentran dentro de un área específica 1. Esta relación se basa en coeficientes de distribución de cráteres de la Luna usando una función por partes que compara las distribuciones de la Luna y Marte, alineando el modelo Lunar para determinar una isócrona o modelo cronológico para Marte 2 Ivanov (2001); Neukum y cols. (2001). El análisis considera las

diferencias físicas entre la Luna y Marte, pero también asume que ambos cuerpos planetarios fueron afectados por las mismas distribuciones de proyectiles.

$$\log N = \sum_{j=0}^m a_j (\log D)^j$$

Ecuación 1: Ecuación de la función de producción descrita en Kneissl y cols. (2011).  $N$  es el acumulado de la frecuencia de cráteres,  $a_j$  es uno de los coeficientes de producción, y  $D$  es el tamaño del diámetro en km.

$$\log N(1) = A(\exp(Bt) - 1) + Ct$$

Ecuación 2: Ecuación cronológica descrita en Kneissl y cols. (2011).  $N(1)$  es el acumulado de la frecuencia de cráteres mayores o iguales a 1 km en diámetro,  $A$ ,  $B$ , y  $C$  son constantes que dependen del cuerpo planetario y  $t$  es el tiempo medido en Ga.

### 3 | Incertidumbre

El proceso de estimación de la edad puede tener errores asociados con la proyección de las imágenes. Estos pueden resolverse haciendo algunas suposiciones, por ejemplo: se asume que los cráteres tienen una forma circular obviando los impactos oblicuos. La distorsión de la forma disminuye la precisión de la medición Kneissl y cols. (2011).

El uso de CraterTools ayuda con los errores de proyección debido a que proyecta de forma interna el cráter dentro en una proyección sinusoidal. La cual proporciona mayor precisión en la medición de propiedades geométricas como el diámetro del cráter y el tamaño del área Kneissl y cols. (2011).

Otros errores están relacionados con la morfología de la superficie. Durante las mediciones es necesario identificar solamente cráteres dado que otras formaciones como colapsos, pozos de sublimación, y calderas pueden lucir como cráteres, esto se considera para imágenes con bajas resoluciones. Otros autores excluyen de sus mediciones conjuntos de cráteres de impactos secundarios Dundas y McEwen (2007); Hartmann (2007); McEwen y Bierhaus (2006); Neukum y cols. (2010); Werner, Ivanov, y Neukum (2009), su presencia crea errores en la estimación de la edad de la superficie.

## IV | MEDICIONES

La parte occidental de la planicie de Ophir fue seleccionada debido a la base de datos disponible, y las características de la superficie. El área posee una pendiente poco profunda hacia el este de la provincia de Tharsis. Se considera que superficies horizontales facilitan las mediciones Basilevsky (1976).

Se midieron un total de 816 cráteres en un rango que va desde  $\sim 100$  m hasta 45 km de diámetro, estos ubicados dentro de un área de  $\sim 130,000$  km<sup>2</sup>. Se separó la distribución para usar solo los cráteres con diámetro  $> 2$  km clasificándolos como *Standard*, excluyendo así los cráteres con diámetros  $< 2$  km clasificándolos como *Marked 2* ya que se consideran una muestra no representativa. Esto debido a que su tamaño representa una edad relativamente joven la cual no representa la edad de la planicie de Ophir.

Prueba de esta preposición se observara en las siguientes secciones.

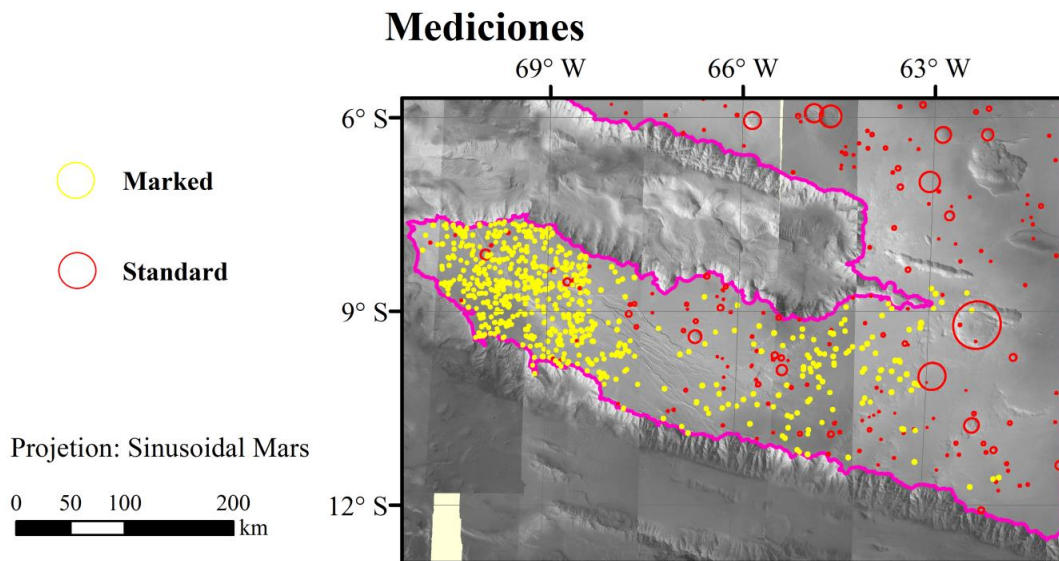


Figura 2: Área seleccionada aparece de la región occidental de la planicie de Ophir, Valles Marineris (Marte). Los cráteres se clasifican en (1) *Marked* en amarillo con diámetros < 2 km (2) *Standard* en rojo con diámetros > 2 km.

## V | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1 | Planicie occidental de Ophir

Comparación de los resultados muestra que los cráteres clasificados como *standard* se alinean con un período específico cuya edad es  $3.70 \pm 0.02$  Ga. Se observa que los cráteres con diámetros < 2 km no se alinean con la isócrona determinada validando su exclusión. El valor de la edad determinada para la planicie occidental de Ophir resultó ser preciso ya que obtuvo una incertidumbre absoluta del 1%. El resultado es corroborado al ser comparado con resultados existente de Michael (2013).

Se sugiere que la edad estimada para la planicie occidental de Ophir (i.e.  $3.70 \pm 0.02$  Ga) se encuentra dentro del período Hespérico temprano. Estudios previos Tanaka, Robbins, Fortezzo, Skinner, y Hare (2014) han determinado la edad de la superficie Marciana en una escala mayor en donde se sugiere que la edad de la planicie de Ophir es Hespérico medio o tardío. Esos resultados describen regiones más pequeñas dentro de la planicie como Noeico tardío. Se sugiere que los resultados difieran debido a la cobertura del área analizada. El área seleccionada posee una densidad que la clasifica como Hespérico temprano debido a una dominancia en la tendencia. Se propone que una división del área es necesaria y que las características estructurales son una gran influencia en la división del área.

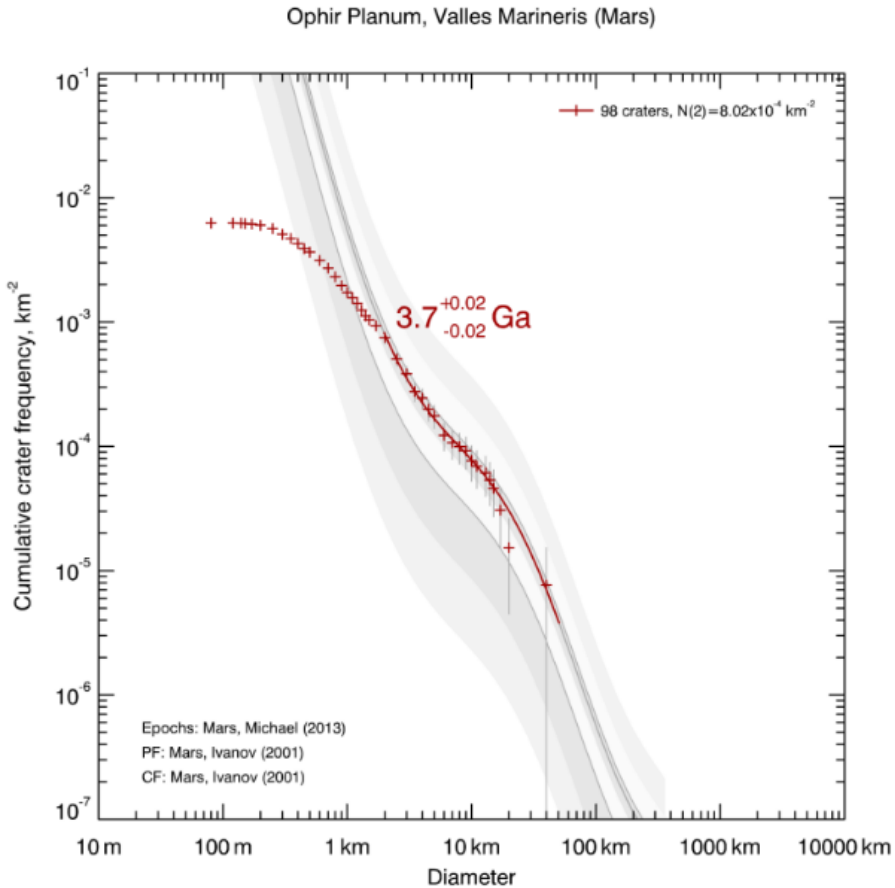


Figura 3: Resultados de CraterStats: Estimación de la isócrona del área seleccionada de la planicie de Ophir utilizando el modelo cronológico de Marte Michael (2013)

## 2 | División de la planicie occidental de Ophir

La división del área se realizó considerando las características estructurales (e.g. grabens, crestas, y cadenas de pozos) y morfológicas visibles en la planicie. Algunas de estas características aparecen como parte del tectonismo formado por el abultamiento de la provincia de Tharsis Tanaka y cols. (2014); Watters (2004) El área se delimitó en segmentos o áreas de menor tamaño para analizar individualmente distribuyendo los cráteres entre los segmentos 4. En caso de que un cráter se superponga a dos áreas, el cráter se fragmenta asignando un porcentaje a cada área. Este procedimiento es automático con

CraterTools, utiliza el centro del cráter como punto de referencia para distribuir el área del cráter como fracción. El valor o la fracción funcionarán como un valor de peso durante el análisis estadístico.

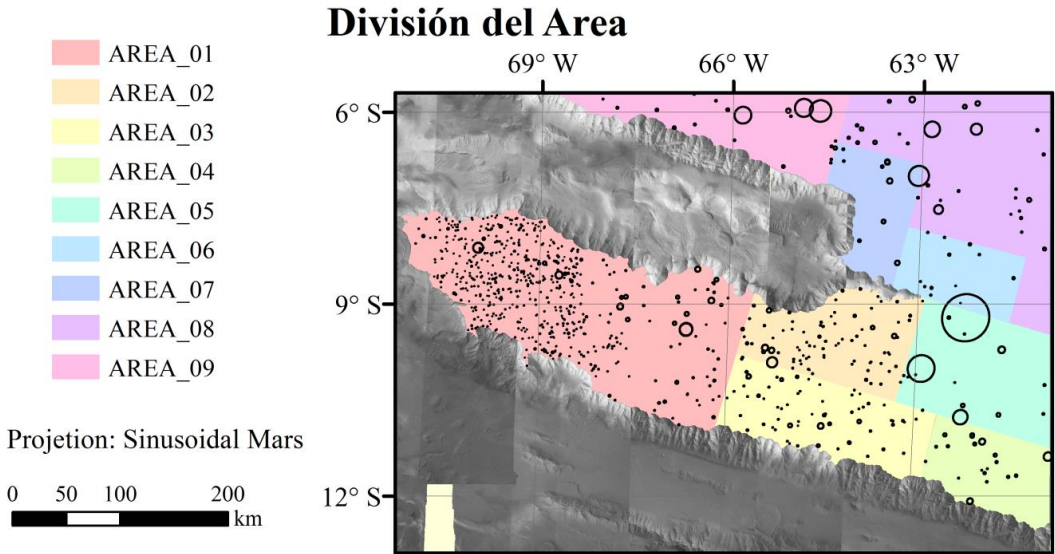


Figura 4: División del área seleccionada de la planicie occidental de OPHIR. Las áreas se clasifican de acuerdo con las características que contienen: (1) grabens (2) características estructurales (3) crestas (4) cresta con una pequeña población de cráteres (5) crestas curvadas con cráteres de gran tamaño (6) cadenas de pozos (7) flujo de lava y/o pequeños canales fluviales (8) formación escarpes (9) características estructurales de menor tamaño.

La división del área permitió la creación de un mapa con la escala de tiempo resultante para el área principal seleccionada 5. El mapa muestra resultados que identifican las áreas más antiguas asociadas con la formación de crestas consistente con los hallazgos de estudios previos Carr y Head (2010). Estos estudios sugieren que las crestas son unas de las primeras estructuras formadas durante el abultamiento de la provincia de Tharsis.

Áreas como AREA\_09 (4 y 5) muestran discrepancias al asociarse con una edad más avanzada, aunque posee una distribución amplia que relaciona la densidad de cráteres con una tendencia más cercana al Hespérico temprano 5. Este resultado difiere de Tanaka y cols. (2014) cuyos hallazgos sugieren una edad Hespérica media a temprana. La diferencia parece estar asociada con la distribución de cráteres.

Un área específica que llama la atención es el AREA\_06 5, esta área parece estar ubicado en un período más joven de lo esperado 5. El resultado está asociado a la formación de la cadena de pozos y la extensión de los canales que van hacia adentro de la planicie. Estas estructuras y su formación se relacionan con procesos de erosión y al colapso de la superficie. Es posible que la distribución de cráteres para esa área haya sido borrada debido a procesos erosionales. También es considerado que la formación de la cadena de pozos está asociada con cráteres que se conectaron entre sí creando la estructura.

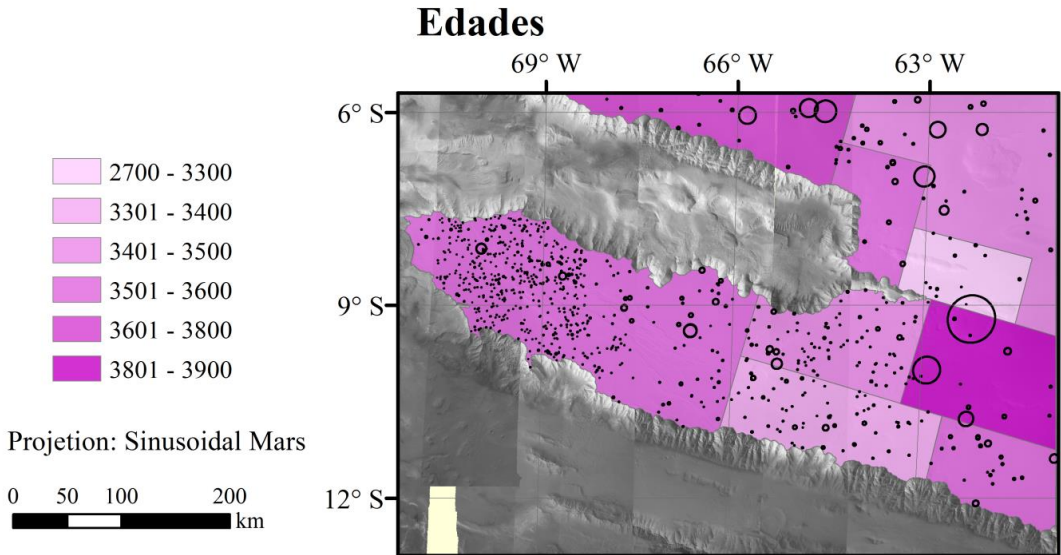


Figura 5: Estimación absoluta resultante de la edad para cada área seleccionada. Los resultados se obtuvieron utilizando las funciones cronológicas de Ivanov (2001)

Pruebas de esto son necesarias para corroborar la existencia de la discrepancia, pero se considera que puede ser un error en la delimitación del área.

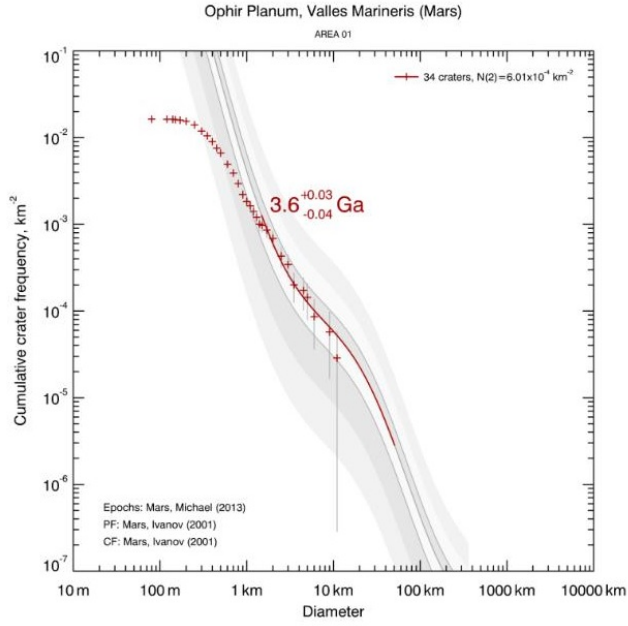
Los resultados de las densidades de cráteres se comparan con resultados de estudios previos que utilizaron imágenes de menor resolución Witbeck, Tanaka, y Scott (1991). Witbeck et al. (1991) realizó una clasificación de áreas basada en la densidad de cráteres y las características en la superficie. Los resultados del área segmentada y el mapa geológico de Witbeck et al. (1991) son comparables e indican que el AREA\_09 tiene una edad estimada entre el Noeico tardío a Hespérico temprano. En cuanto al AREA\_06, los resultados presentan una diferencia similar a la de Tanaka et al., [2014]. Este resultado se considera una discrepancia a partir estimación de la isócrona.

### 3 | Densidad de cráteres y estructuras superficiales

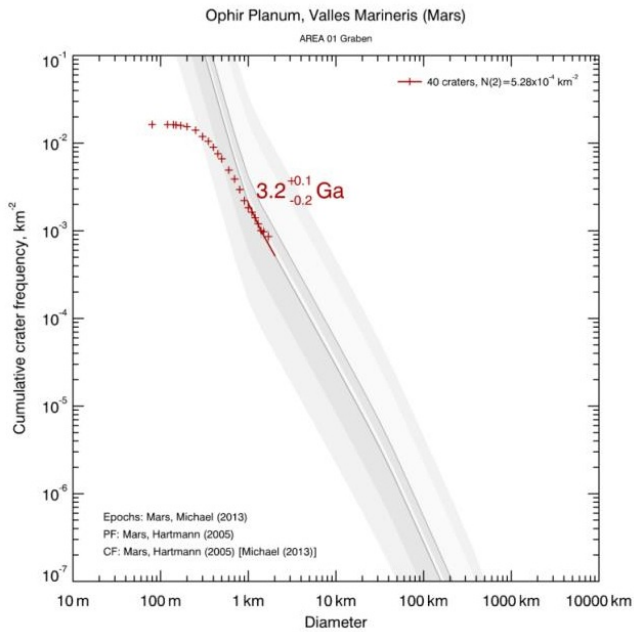
Una mirada más cercana al AREA\_01, AREA\_02 y AREA\_03 4 y a la relación entre las estructuras y las densidades de cráteres sugiere que la densidad de cráteres se puede asociar con el tiempo de la formación de las estructuras. Las estructuras analizadas para este caso son grabens cuya distribución es lo suficientemente grande para ser relativamente antiguas.

Se determinó la edad de la densidad de cráteres del AREA\_01 y la densidad de cráteres sobre los grabens 6a. Los resultados para la edad estimada del AREA\_01 indican que el área tiene una edad en el período Hespérico temprano. Aunque la densidad de cráteres sobre los grabens infiere que son posiblemente de un período Hespérico tardío 6b. Este resultado es comparable a estudios tectónicos previos que sugieren que los grabens dentro de la planicie de Valles Marineris son de origen Hespérico tardío Schultz (1991). Esto sugiere que se puede establecer una conexión entre los grabens y la densidad de cráteres.





(a)



(b)

Figura 6: Densidad de cráteres (a) del AREA\_01 usando Ivanov [2001] y (b) de los grabens usando Hartmann [2004]

## VI | CONCLUSIÓN

Los programas CraterTools y CraterStats son herramientas óptimas, rápidas y accesibles para determinar la edad de superficies planetarias utilizando la metodología recuento de cráteres.

La estimación de la edad para el área seleccionada de la planicie de Ophir no se puede definir como una respuesta simple teniendo en cuenta la historia geológica de la zona. No obstante, los resultados son comparables a estudios previos y se realiza la correspondencia de cada resultado. Se considera que previo a cualquier estudio de recuento de cráteres se debe realizar una clasificación geomorfológica de la superficie. Esto facilitará la delimitación y clasificación la zona, y posiblemente la subclasificación de las áreas en correspondencia con sus formaciones.

## I | REFERENCIAS

- Baldwin, R. B. (1971, 02). On the history of lunar impact cratering: the absolute time scale and the origin of planetesimals. *Icarus*, 14(1), 36.
- Basaltic Volcanism Study Project. (1981). *Basaltic volcanism on the terrestrial planets*. Pergamon Press, Inc., New York.
- Basilevsky, A. (1976). *On the rate of evolution of small lunar craters* (Vol. Volume 7 of Lunar and Planetary Institute Technical Report). Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts.
- Carr, M. H., y Head, J. W. (2010, 06). Geologic history of Mars. *Icarus*, 294, 185-203.
- Crater Analysis Techniques Working Group. (1979, 02). Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data. *Icarus*, 37(2), 467-474.
- Dundas, C. M., y McEwen, A. S. (2007, 02). Rays and secondary craters of tycho. *Icarus*, 186(1), 31-40.
- Hartmann, W. K. (1972, 07). Paleocratering of the moon: Review of post-apollo data. *Astrophysics and Space Science*, 17(1), 48-64.
- Hartmann, W. K. (1973, 07). Martian cratering, 4, mariner 9 initial analysis of cratering chronology. *Journal of Geophysical Research*, 78(20), 4096-4116. (Planets)
- Hartmann, W. K. (2007, 07). Martian cratering 9: Toward resolution of the controversy about small craters. *Icarus*, 189, 274-278.
- Hartmann, W. K., y Neukum, G. (2001, 04). Cratering chronology and the evolution of mars. *Space Science Reviews*, 96, 165-194.
- Ivanov, B. A. (2001, 04). Mars/moon cratering rate ratio estimates. *Space Science Reviews*, 96, 87 - 104.
- Ivanov, B. A., Neukum, G., Bottke, W. F., y Hartmann, W. K. (2002). *The Comparison of Size-Frequency Distributions of Impact Craters and Asteroids and the Planetary Cratering Rate* (W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, y R. P. Binzel, Eds.).
- Ivanov, B. A., Neukum, G., y Wagner, R. (2001). *Size-frequency distributions of planetary impact craters and asteroids* (Vol. 261; M. Y. Marov y H. Rickman, Eds.).
- Kneissl, T., van Gasselt, S., y Neukum, G. (2011, 09). Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments - New software tool for ArcGIS. *Planss*, 59, 1243-1254.
- McEwen, A. S., y Bierhaus, E. B. (2006, 02). The importance of secondary cratering to age constraints on planetary surfaces. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 535-67.
- Michael, G. G. (2013, 09). Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Multiple resurfacing episodes and differential isochron fitting. *Icarus*, 226, 885-890.
- Morbidelli, A., Bottke, W. F., Jr., Froeschlé, C., y Michel, P. (2002, 03). Origin and Evolution of Near-Earth Objects. En W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, y R. P. Binzel (Eds.), *Asteroids iii* (p. 409-422).
- Neukum, G. (1971). *Untersuchungenuber einschlagskrater auf dem mond. ph.d. thesis*. Universitat Heidelberg, Germany.
- Neukum, G. (1977, 03). Lunar cratering. *Philosophical transactions of the royal society a mathematical, physical and engineering sciences*, 285, 267 - 272.
- Neukum, G. (1983). *Meteoritenbombardement und Datierung planetarer Oberflächen, Habilitation Dissertation for faculty membership*. Fakultät für Geowissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität München, Germany.

- Neukum, G., Basilevsky, A. T., Chapman, M., van Gasselt, S., Michael, G., Jaumann, R., . . . Lanz, J. (2010, 03). The geologic evolution of mars: Episodicity of resurfacing events and ages from cratering analysis of image data and correlation with radiometric ages of martian meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 204 - 222.
- Neukum, G., Ivanov, B. A., y Hartmann, W. K. (2001, 04). Cratering Records in the Inner Solar System in Relation to the Lunar Reference System. *Ssr*, 96, 55-86.
- Neukum, G., y Wise, D. (1976). Mars - a standard crater curve and possible new time scale. *Science*, 194, 1381-1387.
- Schultz, R. A. (1991). Structural development of coprates chasma and western ophir planum, valles marineris rift, mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 96(E5).
- Soderblom, L. A., Condit, C. D., West, R. A., Herman, B. M., y Kreidler, T. J. (1974, 07). Martian planetwide crater distributions - Implications for geologic history and surface processes. *Icarus*, 22, 239-263. doi:
- Tanaka, K. L., Robbins, S. J., Fortezzo, C. M., Skinner, J. A., y Hare, T. M. (2014, 05). The digital global geologic map of Mars: Chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history. *Planets*, 95, 11-24.
- Watters, R. (2004, 10). Elastic dislocation modeling of wrinkle ridges on Mars. *Icarus*, 171, 284-294.
- Weissman, P. R., Bottke Jr., W. F., y Levison, H. F. (2002). *Evolution of comets and asteroids* (Vol. this volume; e. In Asteroids III (W. F. Bottke Jr. et al., Ed.). University of Arizona, Tucson.
- Werner, S., Ivanov, B., y Neukum, G. (2005). *Major aspects of the chronostratigraphy and geologic evolutionary history of mars, ph.d. thesis*. Fachbereich Geowissenschaften Freie Universitat, Berlin.
- Werner, S. C., Ivanov, B. A., y Neukum, G. (2009, 04). Theoretical analysis of secondary cratering on Mars and an image-based study on the Cerberus Plains. *Icarus*, 200, 406-417.
- Witbeck, N., Tanaka, K., y Scott, D. (1991). Geologic map of the valles marineris region, mars. *USGS*.
- Öpik, E. J. (1960). The lunar surface as an impact counter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 120(5), 404.