

13/2019

12 de febrero de 2019

Luis Vázquez y

José Luis Vázquez-Poletti

La gran aventura de la exploración
de Marte

La gran aventura de la exploración de Marte

Resumen:

Se presenta una panorámica del contexto histórico asociado a la exploración actual de Marte. Junto a la información básica sobre Marte se presentan los recientes resultados de la exploración. Finalmente se describe el impacto de la exploración de Marte en los medios.

Palabras clave:

Marte, exploración de Marte, misiones a Marte, estudios marcianos en España, atmósfera de Marte, lunas marcianas, radiación solar, campo magnético.

***NOTA:** Las ideas contenidas en los *Documentos de Opinión* son de responsabilidad de sus autores, sin que reflejen, necesariamente, el pensamiento del IEEE o del Ministerio de Defensa.

*The big adventure of the exploration of Mars**Abstract:*

We introduce a panoramic view of the historical context associated to the present Martian exploration along with a summary of basic Martian information as well as the recent exploration achievements. Also we discuss the impact of Mars exploration in the media.

Keywords:

Basic Information about Mars, Mars exploration, Missions to Mars, Spanish Martian studies, Martian atmosphere, Mars moons, Solar irradiance, Magnetic field, Mars in the media

Los grandes avances en la comprensión del universo han sido posibles gracias al trabajo de algunos de los mayores gigantes de la ciencia como Galileo, Copérnico y Newton. Hoy sabemos que el 96 % de lo que, en términos de materia y energía, constituye el universo aún nos es desconocido. Verdaderamente son muchísimos los secretos pendientes de su descubrimiento. La llave para abrir los cofres que contiene estos secretos está en la comprensión profunda de dos conceptos aparentemente simples, pero increíblemente complejos en la realidad: el espacio y el tiempo. Actualmente, se continúa explorando la conexión entre la materia y la energía con el espacio y el tiempo como ya Einstein había intuido.

Con instrumentos sofisticados, los nuevos ojos tecnológicos, se siguen investigando los límites, estructura y evolución del universo que nos rodea. En este contexto, se ha de destacar el reciente descubrimiento de las ondas gravitacionales. Por otra parte, cabe hacer una mención especial a los descubrimientos y amplias observaciones del telescopio espacial Hubble de la NASA/ESA, como han sido los siguientes: la observación de las galaxias más lejanas y la luz estelar más antigua jamás vista por la humanidad; la edad y tamaño del universo que se expande a un ritmo cada vez mayor; los conocimientos sobre el nacimiento y muerte de las estrellas; el descubrimiento de exoplanetas y discos protoplanetarios; el hallazgo de agujeros negros, cuásares y galaxias activas; la formación de estrellas, de materia y energía oscuras, así como de lentes gravitacionales.

Frente a todo el marco contextual mencionado anteriormente, podemos resaltar que la exploración espacial es transdisciplinar e interdisciplinar, puesto que involucra de forma transversal diferentes áreas del conocimiento. De esta manera, la exploración espacial es una fuerza fundamental de arrastre para empujar las fronteras de los nuevos escenarios para la humanidad.

En el ámbito de la investigación científica contamos con seis áreas básicas donde la tecnología tiene un impacto fundamental y que corresponden a los elementos conductores interrelacionados de una misión espacial:

- Limitaciones de masa.
- Limitaciones de potencia en el lanzamiento y posteriormente el uso en forma de energía eléctrica.
- Control térmico de la compleja estructura asociada.

- Limitaciones en la transmisión de datos: ancho de banda, distancia de transmisión y tamaño de la antena.
- Efectos de diferentes tipos de radiación solar, partículas y radiación cósmica.
- Efectos de impactos de micropartículas y corrosión.

Una misión espacial puede fallar, pero lo que no puede fallar es haber creado un entorno de educación e investigación científico y tecnológico. Esto permitirá tener nuevas generaciones de estudiantes con protocolos mentales y flexibilidad para el trabajo en las nuevas fronteras del conocimiento e innovación. La exploración espacial es similar a la exploración de los secretos del ADN. En este momento, todavía no sabemos hasta dónde podremos llegar, pero lo importante es que en cada paso de ambas exploraciones nosotros aprenderemos y conseguiremos la llave para abrir la puerta a mundos inesperados.

En esta contribución nos vamos a centrar en aspectos relevantes de la exploración del planeta Marte, concepciones pasadas, presentes y futuras.

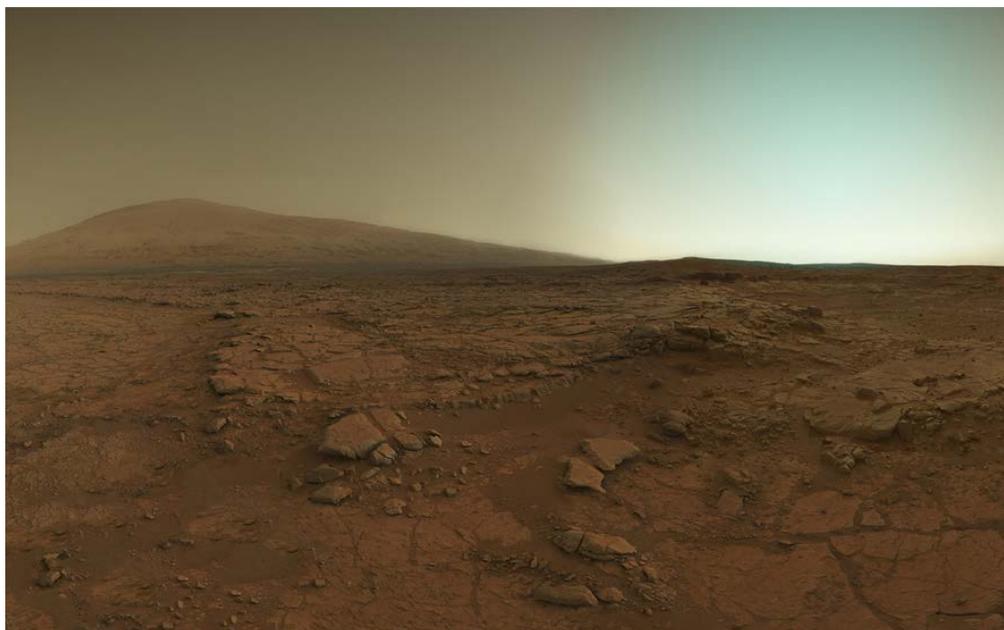


Figura 2: Superficie de Marte captada por MSL Curiosity. Fuente: NASA JPL

La exploración de Marte

Un paseo a lo largo de la historia de la observación y estudio de Marte: desde la pura contemplación hasta los telescopios y espectrómetros

Podemos considerar cuatro bloques de caminos que nos llevan a Marte desde «la pura contemplación» en las antiguas civilizaciones, a la ayudas con los «telescopios», y actualmente mediante «las misiones no tripuladas» hasta la última fase del «cine, entrenamiento y simulación» que convergerán en las «misiones tripuladas a Marte».

El planeta Marte aparece referido en las antiguas culturas con diferentes nombres pero con un significado relativo al color rojo así como a un entorno guerrero, del combate y la guerra. Dichos nombres son los siguientes:

Egipto: Harmakhis y Har Décher / Babilonia: Nergal / Éufrates: Allamou y Almou.

Grecia: Ares / culturas árabe, persa y turca: Mirikh / Persia: Bahram y Pahlavani Sipher / India: Angaraka y Lohitanga.

El conocimiento adquirido en tal periodo de contemplación se refiere, además de al color rojo, al hecho de que presenta una trayectoria extraña, de forma que reaparece cada dos años. En relación con ello, Aristóteles observó la ocultación de Marte por la Luna afirmando que «Marte está más alto que la Luna».

En cuanto a la fase de «observación con telescopios», cabe destacar que la primera observación fue realizada por Galileo Galilei en 1609. En el siglo xvii se han de resaltar las observaciones de Christian Huygens y Giovanni Domenico Cassini; mientras que en el siglo xviii resaltan las observaciones de Frederick William Hershell.

Por otra parte, es importante mencionar la descripción detallada de las lunas marcianas Fobos y Deimos por Jonathan Swift en *Los Viajes de Gulliver* (1726) 150 años antes de su descubrimiento con el telescopio por Asaph Hall. Se trata de un enigma que ha generado muchas preguntas.



Figura 3: Luna Fobos. Fuente: NASA JPL

En 1830 se comenzaron a realizar mapas y cartografías coincidiendo con la gran aproximación de Marte y la Tierra. En este contexto, no se debe olvidar el trabajo realizado por Giovanni Virginio Schiaparelli (Observatorio de Milán), Percival Lowell (Observatorio de Flagstaff, Arizona, EE. UU.) y Eugène Michael Antoniadi (Observatorio de Meudon, Francia).

Mediante el telescopio fue posible observar la duración de un día marciano, la existencia de estaciones en ambos hemisferios, la presencia de casquetes polares, así como de gigantescas tormentas de polvo en la superficie.

Por otra parte, durante los años veinte comenzó la aplicación de la espectroscopía y radiometría al estudio de Marte, abriendo nuevos horizontes cuya exploración continúa con las misiones espaciales.

Misiones no tripuladas a Marte, los enigmas del planeta y la comparación con la Tierra

La fuerza de arrastre de las misiones a Marte es tratar de encontrar muestras de vida presente o pasada. Para ello, una condición necesaria, pero no suficiente, consiste en determinar si hay agua actualmente y determinar la historia de su posible presencia en Marte.

El lanzamiento de misiones a Marte fue inaugurado por la Unión Soviética en 1960. Hasta la fecha habría que contabilizar un total de 42 misiones, de las cuales 18 han tenido éxito. A estas hay que añadir las siguientes misiones recientes:

- India: lanzamiento 5 de noviembre de 2013 Mars Orbiter (MOM).
- EE. UU.: lanzamiento 18 de noviembre de 2013 MAVEN.
- Rusia-ESA: marzo-octubre de 2016 ExoMars 2016.
- EE. UU.: lanzamiento 5 de mayo de 2018 InSight.

En este contexto, se debe resaltar el proyecto de misión a Marte METNET de Rusia, Finlandia y España encaminada a colocar una red de estaciones meteorológicas en Marte. Gracias a ello se ha permitido crear un entorno internacionalmente relevante de investigación marciana en España y de forma especial en el INTA y la Universidad Complutense de Madrid¹.

¹ Boletín Electrónico de SEMA, n.º 14. Enero 2017, pp. 3-15.



Figura 4: ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter. Fuente: ESA

Algunas de las características observadas son que la presión atmosférica en la superficie es del orden de 6,35 mbar (0,7 % la de la Tierra); similar a la presión de la atmosfera de la Tierra entre 28 y 40 km.

La atmósfera es en extremo oxidante, dando a Marte su color rojo característico. Por ser la atmosfera tan tenue, puede existir una diferencia de temperatura de hasta 15°C entre el suelo y 1 m de altura, así como grandes diferencias entre el día y la noche, al no existir océanos y mares que regulen la temperatura como en la Tierra.

Los principales descubrimientos del Programa de Exploración de Marte (MEPAG: Mars Exploration Program Analysis Group)² se pueden resumir en el siguiente esquema:

² Disponible en: <http://mepag.jpl.nasa.gov/science/index.html>.

1. Existencia de agua líquida durante largos periodos en la antigua superficie marciana. Este hecho aumenta la probabilidad que la vida o una forma primaria de vida se haya desarrollado en Marte durante su historia temprana³.
2. Geología compleja de la superficie. La superficie marciana es muy variada desde el punto de vista geológico. Por otra parte, su evolución determina si la vida ha podido desarrollarse y evolucionar en Marte⁴.
3. Existencia de agua en la actualidad. Se han descubierto depósitos de hielo cerca de la superficie, agua en glaciares de latitud media y en los dos casquetes polares, un ciclo activo de agua que incluye hielo y nieve. Además, la existencia de torrenteras (gullies) sugiere episodios recientes de formación debidas al agua. La implicación de todo ello es que Marte no es un mundo estático y árido, ya que ha sido configurado por el agua. Si la vida se desarrolló, podemos concebir que todavía sobreviva⁵.
4. Cambio climático reciente. Se acumulan las evidencias de que Marte experimenta cambios climáticos periódicos muy dramáticos y que ahora parece estar en un proceso de calentamiento. Los cambios parecen debidos a grandes oscilaciones en la órbita de Marte y fluctuaciones de su eje de rotación. Los mecanismos del cambio climático global de Marte permitirán dar luz sobre el cambio en la Tierra⁶.
5. Magnetismo planetario. No existe un campo magnético global como en el caso de la Tierra. Existe un archipiélago de zonas con campo magnético de diferentes intensidades que permiten la observación de auroras. La misión MGS (Mars Global Surveyor) descubrió y cartografió una magnetización intensa en la corteza de Marte. Los datos indican que Marte tuvo un campo magnético global generado por una dinamo que se detuvo. El campo magnético protegía la superficie del viento solar, permitiendo que la atmósfera y el agua fueran retenidas. Su ausencia generó la transición de un planeta húmedo al árido actual de acuerdo con los datos geológicos⁷.
6. Clima y meteorología. Las observaciones proporcionan una imagen de la meteorología y la dinámica de la atmósfera. El polvo es un elemento clave de la

³ S.W. Squyres et al. Science 306, 1698-1703 (2004) and Science 313, 1403-1407 (2006); J. Grotzinger et al. Geology, 34, 1085-1088 (2006); S.C. Schon et al. Geology 37, 207-210 (2009).

⁴ S.W. Squyres et al. Science 320, 1063-1067 (2008); R.E. Milliken et al. Geology 36 (11), 847-850 (2008); J.M. Mustard et al. Nature 354, 305-309 (2008).

⁵ Mitrofanov et al. Science 297 (5578), 78 (2002); P.H. Smith et al. Science 325, 58-61 (2009); J.Holt et al. Science 322(5905), 1235-1238 (2008); M.C. Malin et al. Science 314, 1573 (2006).

⁶ J.A. Laskar et al. Nature 419, 375-377 (2002); Icarus 170, 343-364 (2004); J.W. Head et al. PNAS 105 (36) 13258-13263 (2008); K.W. Lewis et al. Science 322, 1532 (2008).

⁷ M.H. Acuña et al. Science 284, 790-793 (1999); J.H. Roberts et al. J. Geophys. Res. 114, E04009 (2009).

meteorología marciana. Grandes diferencias de temperaturas implica vientos (torbellinos) a todas las escalas y polvo en la atmósfera. Por otra parte, cabe resaltar que en Marte se pueden observar cielos rojos y puestas de sol azules, mientras que en la Tierra se tiene cielos azules y puestas de sol rojas⁸.

7. Procesos modernos. La obtención sistemática de imágenes durante tres años marcianos ha proporcionado datos sobre las velocidades de los diferentes procesos en la superficie de Marte. Se está comenzando a entender dicha evolución de Marte⁹.
8. Metano. Se ha detectado metano en la atmósfera de Marte, producido en regiones específicas de la superficie y ha sido confirmado por observaciones repetidas. Su origen puede ser geológico o biológico. El metano como tal es inestable en la atmósfera debido a su destrucción por la radiación ultravioleta. De esta manera se puede afirmar que su producción es en tiempo real. Actualmente, se está estudiando su presencia en la atmósfera a través de la información proporcionada por el instrumento ACS del módulo orbital de ExoMars2016¹⁰. Su presencia indica que hay un mecanismo generador de metano en Marte.
9. Gravedad y topografía. Se ha obtenido un mapa de gran resolución de la topografía global de Marte y del campo gravitatorio, junto a la determinación remota de la estructura interna y de ciertos aspectos de la evolución. Las variaciones del campo gravitatorio afectan a las órbitas de los diferentes satélites. Uno de los importantes enigmas es la asimetría entre los dos hemisferios: el norte es llano y más bajo (6 km) que el sur, el cual está caracterizado por la presencia de muchos cráteres¹¹.
10. Entorno de radiación. Es fundamental para el desarrollo de la vida en el pasado y eventualmente en el futuro (misiones tripuladas). La radiación en la superficie de Marte es unas 2,5 veces (Mars Odissey) la radiación en la estación espacial internacional.

⁸ P.B. James et al. *Adv. Space Res.* 29 (2), 121-129 (2002); N.T. Bridges et al. *Geophys. Res. Lett.* 34, L23205 (2007); M.D. Smith «Spacecraft observations of the martian atmosphere» *Annu. Rev. Earth. Planet Sci.* 36, 191-219 (2008).

⁹ M.C. Malin et al. *Science* 317, 1573 (2006); P. Russell et al. *Geophys. Res. Lett.* 35, L23204 (2008); J.D. Pelletier et al. *Geology* 36 (3), 211-214 (2008).

¹⁰ V. Formisano et al. *Science* 306, 1758-1761 (2004); M. Mumma et al. *Science* 323, 1041-1045 (2009); F. Lefevre et al. *Nature* 460, 720 (2009).

¹¹ M.T. Zuber et al. *J. Geophys. Res.* 112, E05S07 (2007); F. Nimmo et al. *Nature* 453, 1220-1223 (2008); S. Zhong, *Nature Geoscience* 2(1), 19 (2009).

La radiación que recibe Marte es principalmente electromagnética, solar (intermitente, protones de baja energía) y debida a los rayos cósmicos galácticos (extrasolares; continuos; núcleos atómicos muy energéticos que afectan al ADN)¹².

España y la exploración de Marte

En el contexto del entusiasmo por la exploración de Marte, tenemos las actividades del Grupo de Investigaciones Marcianas Complutense (GIMC) en la Universidad Complutense de Madrid (UCM) desde 2007. Se ha de considerar la participación de varias facultades y departamentos de la UCM, así como las colaboraciones con otras universidades: Universidad Autónoma de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad Pontificia Comillas; y centros de investigación como el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y el Instituto Astrofísico de Andalucía (IAAA).

Previamente, se han de resaltar dos actividades marcianas en el ámbito de la UCM:

- El vídeo del NODO¹³ de 1956 y relacionado con los estudios marcianos de los profesores Gullón, Martín Lorón y López Arroyo del Observatorio de Madrid.
- Posteriormente hemos de referirnos al Grupo de Planetología de gran relevancia científica del profesor Francisco Anguita Virella de la facultad de Geología de la UCM. Un resultado de impacto de dicho grupo fue la publicación de *Historia de Marte, mito y exploración*¹⁴.

El acontecimiento singular que lanzó y empujó la investigación marciana en la UCM fue la creación del Centro de Astrobiología asociado a la NASA en 1998¹⁵, del cual Francisco Anguita y Luis Vázquez fueron cofundadores.

Fue así como Luis Vázquez comenzó a estar involucrado en las misiones a Marte. La primera participación fue en el periodo 2001-2003: Beagle 2 (Mars Express, ESA) mediante la coordinación de la calibración de los sensores de ultravioleta. En el periodo 2004-2007, participó como investigador principal (IP) y Francisco Valero como Co-I de REMS-Curiosity (NASA)¹⁶.

¹² C. Zeitlin et al. Adv. Space Res. 33, 2204-2210 (2004); D. M. Hassler et al. 40th Lunar and Planetary Science Conference, March 23-27 (2009). The Woodlands TX; Vázquez et al. Optics Letters 31(10), 1420-1422(2006); 32(17) 2596-2598 (2007). Inverse Problems 25, 115023 (2009). REMS-MSL.

¹³ Disponible en <https://www.youtube.com/watch?gl=SN&hl=fr&v=HYXnJHpKpdo>.

¹⁴ ANGUITA, F. *Historia de Marte, mito y exploración*. Editorial Planeta 1998.

¹⁵ Disponible en <http://www.cab.inta-csic.es/es/inicio>.

¹⁶ Disponible en <http://mars.jpl.nasa.gov/msl>.

La misión que finalmente estructuró el entorno de investigación marciana en la UCM fue el proyecto conjunto METNET (Meteorological Network) de España (INTA, UCM, UC3M e Instituto de Microelectrónica de Sevilla) con Rusia y Finlandia (2007-2015). El objetivo de dicho proyecto es enviar a Marte una red de estaciones meteorológicas¹⁷.

Desde el año 2007, las aportaciones científicas del grupo GIMC se han concentrado en tres bloques temáticos:

- Capa límite planetaria de Marte, campos magnéticos, eléctricos y radiación.
- Minería de datos y modelización, *cloud computing* y cálculo fraccionario.
- Estudios geodésicos marcianos y eclipses de Phobos.

Todos ellos encuadrados en el contexto de los estudios asociados a las misiones REMS-Curiosity (MSL), Mars Express, ACS-ExoMars2016 y ExoMars2020. Ya se han doctorado ocho estudiantes a la vez que se ha generado un amplio número de publicaciones internacionales¹⁸.

Por último, Luis Vázquez fue coautor de uno de los capítulos del libro *The Atmosphere and the Climate of Mars*¹⁹.

¹⁷ Disponible en <http://www.meiga-metnet.org> y <http://metnet.fmi.fi/index.php?id=72>.

¹⁸ *Boletín Electrónico de SEMA*, n.º 14. Enero 2017, pp. 3-15.

¹⁹ TODD CLANCY R.; Forguet, F.; Smith, M. D. and Zurek, R.W. *The Atmosphere and the Climate of Mars*. Eds. R.M. Haberle, Cambridge University Press 2017.



Figura 5: Las dos misiones que conforman el programa ExoMars.
Fuente: ESA y Roskosmos

Camino a Marte: cultura, escenarios digitales y preparación

Marte ha sido objeto de inspiración para muchos en la Tierra. Resultado de ello es la gran cantidad existente de obras literarias, cinematográficas e incluso en formatos más digitales.

La primera película sobre Marte fue *Aelita*, de cine mudo y dirigida por Y. Protazanov en 1924. *Aelita* está basada en la novela de Alexei Tolstoi, pariente lejano de Leon Tolstoi. En ella, la reina de Marte, harta de vivir sometida a su despótico padre, lanza una llamada de socorro a la Tierra. Tras descifrar el mensaje, el ingeniero de la estación de radio de Moscú, al que se une el revolucionario Gusev, emprende un viaje a Marte en la nave que ha construido. Los dos ayudan a Aelita a derrocar al tirano, pero, a continuación, también ella implanta un régimen totalitario.

Entre las películas más recientes se encuentra *El Marciano* (2015), basada en la obra homónima de A. Weir y que narra las aventuras de un astronauta que queda varado en el planeta rojo. Y, por supuesto, no podíamos olvidarnos de la serie *The Expanse*, también basada en la obra de James S. A. Corey, en la que narra las intrigas políticas del sistema solar en las que el planeta rojo tiene mucho que decir. Tanto interés generó en el propietario de Amazon, Jeff Bezos, que adquirió sus derechos para seguir produciéndola después de que SyFy la dejara caer.

Por otra parte, la exploración espacial es una de las fuentes de inspiración del ya considerado como octavo arte. El público abandona una posición pasiva para formar parte de aventuras cada vez más realistas basadas en experiencias reales. En el mercado existe desde un simulador en primera persona y escala 1:1 de la vía láctea con 400 billones de sistemas solares —*Elite: Dangerous*— hasta un videojuego de gestión de programas espaciales —*Kerbal Space Program*—.

Finalmente es importante destacar el experimento Mars-500 en el que una tripulación de seis personas han estado aisladas durante 520 días (periodo 2007-2011) simulando una expedición a Marte.



Figura 6: Captura del *Kerbal Space Program*. Fuente: YouTube

Por otra parte, los avances tecnológicos hacen que la exploración espacial esté cada vez más presente en la sociedad, convirtiendo al público general en participante activo del proceso. Las metas a alcanzar son mucho más ambiciosas que en los años sesenta y esto hace que sea necesaria una mayor concienciación de la sociedad para alcanzar el presupuesto requerido.

Esta acción activa e integradora pasa por distintas soluciones tecnológicas, entre las que se encuentran las redes sociales. Es un hecho que prácticamente todas las misiones espaciales (incluyendo las Voyager que este año cumplen 40 años) disponen de una cuenta en al menos una red social desde la que suministran información en directo a sus seguidores. Incluso, hay módulos e instrumentos de estas misiones que tienen su propia cuenta —como es el caso de ExoMars 2016—.

Futuro: viajes tripulados a Marte y colonización

Actualmente, se estima que hacia 2030 tendrá lugar la llegada del hombre a Marte. La razón histórica es que desde el descubrimiento de América, cada 60 años se han alcanzado grandes hitos en la exploración, los cuales se indican a continuación:

1492: América / 1550: Las islas del Pacífico / 1610: Japón / 1670: Australia /
1730: Siberia / 1790: Himalaya / 1850: África / 1910: Los polos / 1969: La Luna
2030: ¿Marte?

Como referencia se ha de tener en cuenta que el primer vuelo espacial tripulado tuvo lugar en 1961. En dicho año el presidente J.F. Kennedy anunció que EE. UU. haría llegar un hombre a la Luna antes de 1970; y se cumplió. Por otra parte, para Marte se dispone de más tiempo y de más experiencia en vuelos y estancias en el espacio, incluyendo turistas espaciales.

La primera misión tripulada a Marte requerirá recursos considerables en términos de tiempo, dinero y desarrollo de tecnologías sofisticadas. Dicha misión abrirá la puerta a un nuevo mundo con nuevos descubrimientos científicos y la posible verificación de la existencia pasada o presente de vida en Marte que se inscribe en el contexto de la pregunta fundamental de la humanidad: «¿estamos solos en el universo?». Por otra parte, el establecimiento del hombre en Marte va asociado a tres hitos básicos:

- Demostración completa de los principios de aterrizaje seguro.
- Demostración completa de la movilidad de grandes vehículos.
- Sistema de telecomunicación que permita alcanzar cada lugar de Marte.
- Completar las informaciones orbitales de Marte.

En este contexto, las misiones con éxito de la NASA: MER (Spirit y Opportunity) y MSL (Curiosity) están contribuyendo de una forma fundamental a los objetivos anteriores. Por otra parte, se necesita profundizar en la dirección de los posibles saltos conceptuales que aparecerán en los caminos que se están siguiendo. Así es de destacar:

- Nuevos materiales para conseguir aislamiento térmico adecuado al mismo tiempo que conseguirlo frente a la radiación.
- El sistema de propulsión. En este momento, la agencia rusa de espacio tiene en proyecto una misión de recogida de muestras en la luna Fobos de Marte con la Misión Fobos-Grunt 2. Esto supondría la primera misión de ida y vuelta a Marte con recogida de muestras del entorno marciano, y utilizando el sistema de propulsión actual.
- Consolidación de las misiones a Marte para traer a la Tierra muestras de rocas a diferentes niveles.
- Consolidación de misiones robóticas a Marte.

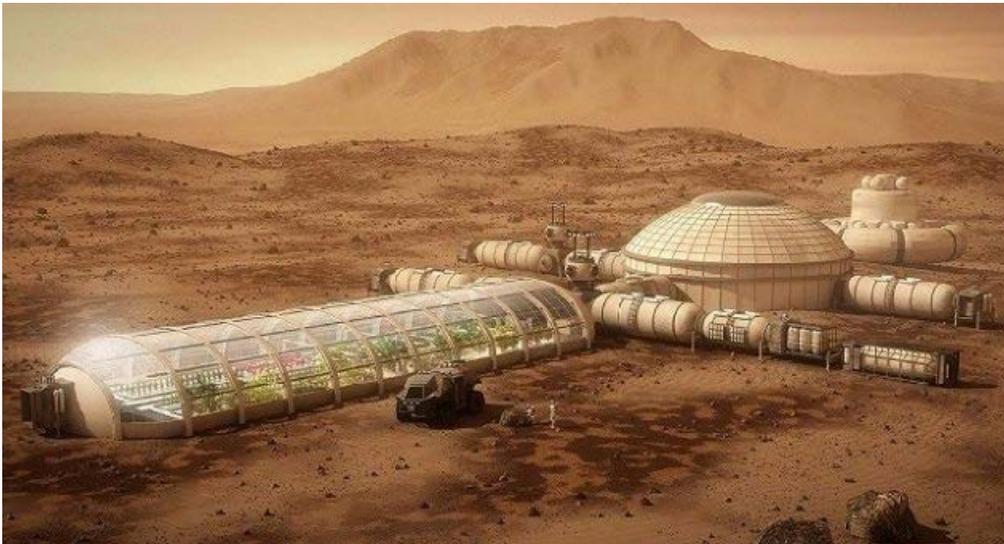


Figura 7: Visión artística de una futura colonia en Marte. Fuente: sknews.ru

Luis Vázquez agradece la ayuda del Ministerio de Economía y Competitividad con el proyecto ESP2016-79135R. José Luis Vázquez-Poletti agradece a la Comisión Europea con el proyecto IN-TIME (GA 823934).

Luis Vázquez

Departamento de Análisis Matemático y Matemática Aplicada e Instituto de Matemática Interdisciplinar (IMI). Facultad de Informática. Universidad Complutense de Madrid.

José Luis Vázquez-Poletti

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática. Facultad de Informática. Universidad Complutense de Madrid.