



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN ASTROFÍSICA
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

Un análisis de la habitabilidad de Marte basado en un
experimento astrobiológico con hongos

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:

IBQ. DAVID ENRIQUE GREEN TRIPP

Directores de Tesis:

Dr. Roberto Vázquez Meza
Instituto De Astronomía

Dra. Patricia Guadalupe Núñez Pérez
Instituto De Estudios Avanzados De Baja California

Ensenada, B.C. México. Julio, 2016.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

Marte es un planeta de suma importancia en el campo de la astrobiología, y gracias a su cercanía con la Tierra y su relativa accesibilidad, ha sido, con gran diferencia, el planeta más estudiado del Sistema Solar, sin contar la Tierra. A pesar de las condiciones adversas que presenta para la vida que se conoce, se cree que el Marte primigenio fue más similar a la Tierra, y que tal vez pudo haberse originado vida en su superficie. Si bien hasta el momento las misiones no tripuladas a Marte no han detectado rastros de vida en el suelo marciano, se ha debatido ampliamente si es posible que algunos organismos terrestres, conocidos como extremófilos, puedan sobrevivir bajo las condiciones que actualmente existen en ese planeta, *i.e.*, bajas temperaturas, intensa radiación ultravioleta, baja presión atmosférica, la inexistencia de un campo magnético, entre otras. La presente tesis discute acerca de la habitabilidad de Marte, analizando sus propiedades, características, y los recientes descubrimientos relacionados con la astrobiología; planteando la cuestión de si Marte puede o no alcanzar el estatus de “habitable”, considerándose el término “planeta habitable” como uno que puede referirse tanto un planeta donde puede surgir la vida, como a uno donde la vida puede asentarse y prevalecer, aun si llega desde otro sitio astronómico. Ha sido estudiada la posibilidad de que seres vivos puedan ser transportados por medio de litopanspermia o contaminación en misiones espaciales desde la Tierra hasta Marte, y sobrevivir en microhábitats o regiones

especiales en su superficie o debajo de ella, que cuenten con suficiente calor y humedad que organismos extremófilos puedan soportar. Un ejemplo de organismos extremófilos son los hongos, los cuales han demostrado ser una de las formas de vida más resistentes en la Tierra. En este estudio, se seleccionaron muestras de los géneros *Aspergillus* y *Alternaria*, las cuales fueron sometidas a condiciones parecidas a las que se han encontrado y estimado en el suelo marciano. Con este experimento se analizó la viabilidad de ambas especies bajo tres diferentes niveles de pH (7, 8, 9), dos temperaturas (28°C, -12°C), y tres tiempos de exposición a radiación UV-C (equivalentes a uno, dos y cinco minutos en Marte), midiendo el crecimiento de las colonias antes y después del tratamiento. Durante tres semanas a 28°C, se observó que *Aspergillus* puede crecer exitosamente en medios a pH 7 y pH 8, pero su crecimiento se ve mermado en pH 9. *Alternaria*, por otro lado, puede reproducirse libremente sin importar si se encuentra en un medio a pH 7, 8, ó 9, aunque mostró una preferencia por pH 7. A baja temperatura (-12°C), el crecimiento de ambas especies se vio ralentizado o detenido, pero en los dos casos recuperaron su tasa de crecimiento normal al volver a condiciones de mayor temperatura (28°C), aunque *Aspergillus* necesitó más tiempo para recuperarse. Por último, en el experimento de radiación, *Aspergillus* fue severamente dañado, mientras que *Alternaria* no. Con estos datos, se infiere que las bajas temperaturas y la radiación UV presentes en Marte son probablemente parámetros más dañinos que el pH alcalino de su suelo. Es posible que el rápido crecimiento inicial y el

desarrollo de capas de hifas de *Alternaria*, junto a la presencia de melanina en sus paredes celulares, sea la causa de su mayor resistencia. Se concluyó que a pesar de las severas condiciones de Marte, letales para el ser humano y la mayoría de los organismos complejos, éstas pueden llegar a ser soportadas en regiones especiales del planeta por los extremófilos si éstos cuentan con la protección necesaria, lo que situaría a Marte dentro de la clasificación de un planeta habitable.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, pues aunque sea una frase trillada, la verdad es que yo no hubiera podido llegar hasta este punto de mi formación académica sin ellos. Hederé mi amor por la ciencia de ellos. Mi padre, Carlos René Green Ruiz, siempre estuvo presionándome (de manera positiva) para que estudiara cuanto me fuera posible. Él mismo es el divulgador científico en nuestra familia por excelencia y la manera en que siempre nos enseñaba a mí y a mis hermanos tuvo gran influencia en que me inclinara por la ciencia en general. De mi madre, Leonor Tripp Quezada, aprendí a que tampoco debía presionarme tanto, y que a veces, tanto en la vida académica como en la cotidiana, a veces hay que frenar un poco y respirar profundo para tomar las decisiones correctas en el camino que uno quiere seguir. Creo que con el paso de los años he intentado equilibrarme entre la presión y la determinación que me enseñó mi padre, y la respiración y el dominio de la (im)paciencia que me enseñó mi madre, y a pesar de mis varios tropiezos, voy poco a poco dominándolo, y eso me ha ayudado a llegar a definir lo que realmente quiero. Gracias a ambos por haberme criado de la mejor manera que pudieron, y apoyarme siempre con sus consejos y su amor.

Por supuesto, esta tesis mucho menos hubiera sido posible sin mis “papás” de la maestría, mis directores de tesis, los doctores Roberto Vázquez Meza y Patricia

Núñez Pérez, quienes me aportaron más que mero conocimiento. A ambos he llegado a tenerles un profundo aprecio. Juntos fuimos construyendo nuestro pequeño e íntimo espacio en lo más alto del Instituto de Astronomía de Ensenada (literalmente hablando), el Laboratorio de Astrobiología. Gracias a ambos por estos dos años tan enriquecedores, y por colorearme más de una vez mi artículo y mi tesis de rojo.

Agradezco a la amiga que me aguantó durante dos años viviendo conmigo, mi querida roomie Karime Jocelyn, y también a los amigos que hice aquí en Ensenada: Chantal, Miguel, Isbak, Rodrigo, Luis Carlos, Ulises y Valeria. Todos ellos ayudaron a que estos dos años fueran mucho más amenos.

Y si de amenizar hablamos, quiero dar las gracias de manera muy especial a mi amada Martha Carmina, con quien me comprometí el mismo mes que empecé a escribir esta tesis. Su apoyo y su amor, incluso a distancia, me permitieron sobrepasar los momentos más difíciles durante mi estancia en Ensenada. En cada momento de estrés o angustia, ella se encargaba de hacerme sonreír, y en cada momento de fatiga, me daba palabras de aliento para continuar.

Finalmente, quiero agradecer a todos los investigadores que me apoyaron de alguna manera u otra durante mi posgrado:

Al Dr. Michael Gerard Richer, al Dr. Mauricio Reyes y a la Dra. Laurence Sabin. También, a quienes aceptaron ser mis sinodales de tesis, las Dras. Sandra Ramírez, María Colín y Yilén Gómez Maqueo, y el Dr. Rafael Navarro.

Agradezco a la beca CONACyT, que me proporcionó techo y comida durante estos dos años; al Instituto de Astronomía por permitirme estudiar en su posgrado; a la Sociedad Mexicana de Astrobiología y a la Agencia Espacial Mexicana, por su apoyo en viajes, escuelas y congresos; y por último a los proyectos CONACYT 128563 y UNAM-DGAPA-PAPIME-PE-109915 que permitieron la realización de este proyecto.

Resumen	i
Agradecimientos	iv
Tabla de Contenido	vii
1. Introducción	1
2. Teoría	5
2.1. Planetas habitables	5
2.2. Marte como sitio de interés astrobiológico	12
2.3. Condiciones en la superficie de Marte	15
2.4. Elementos biogénicos y moléculas orgánicas en Marte	21
2.5. Evento de litopanspermia o panspermia inversa	25
2.6. Extremófilos y hongos como evidencia de la posible habitabilidad en Marte	27
2.7. Propuesta del presente estudio	33
3. Método	36
3.1. Análisis del factor pH	39
3.2. Análisis del factor temperatura	40
3.3. Análisis del factor radiación UV-C	42
4. Resultados	44
5. Discusión	55
5.1. pH	55
5.2. Temperatura	57
5.3. Radiación UV-C	60
5.4. Otras consideraciones sobre habitabilidad	63
6. Conclusiones	67
7. Bibliografía consultada	71
Apéndice	88

1. INTRODUCCIÓN

Marte es el cuarto planeta del Sistema Solar y el último de los planetas interiores o rocosos. Su órbita se encuentra a una distancia media aproximada de 1.52 UA del Sol, y su planeta vecino más cercano es la Tierra (National Aeronautics and Space Administration, s.f.). Es el planeta más estudiado, sin contar a la Tierra misma, debido a esta cercanía y a las condiciones relativamente favorables para las misiones espaciales y de observación. A pesar de ello, una de las interrogantes más importantes sobre Marte se mantiene aún en debate: ¿es o no es Marte un planeta habitable?

Marte posee características que lo hacen un sitio de interés astrobiológico. Entre las más importantes se encuentran: su localización cercana (o incluso interna) a la Zona Habitable solar (Horneck, 2008), su proximidad a la Tierra, y la evidencia de que en el pasado Marte fue similar a ésta, potencialmente habitable, con ambientes acuáticos que quizá perduraron el tiempo necesario para que la vida pudiera originarse (McKay y Davis, 1991; Taubner *et al.*, 2015).

En 1975 dio inicio la misión *Viking*, con el lanzamiento de las dos sondas de aterrizaje, *Viking I* y *II*. El objetivo principal de la misión era buscar evidencia de vida en Marte, y aunque no se encontraron señales de vida ni de moléculas orgánicas complejas (Mancinelli, 1998), estos resultados no fueron definitivos (Navarro-González *et al.* 2003; 2006) y no excluían la posibilidad de que la vida

haya surgido en un Marte más joven (Yen *et al.*, 2000). Incluso, se ha sugerido que es posible que exista vida en el Marte actual, pero en regiones especiales aisladas o subterráneas del planeta aún no exploradas, por lo que es esencial realizar más misiones *in situ* de búsqueda de vida (Mileikowsky *et al.*, 2000; Navarro-González *et al.*, 2006; 2010; Berry *et al.*, 2010; Schuerger *et al.*, 2013).

En la década pasada, fueron detectadas trazas de metano en Marte (Formisano *et al.*, 2004), y no fue hasta la presente década que se detectaron, en la superficie, moléculas orgánicas más complejas: clorobenceno y dicloroalcanos (Freissinet *et al.*, 2015). Estos nuevos descubrimientos, aunados a la también reciente detección de agua en forma líquida (Ojha *et al.*, 2015), han intensificado en esta era el interés astrobiológico hacia el planeta rojo.

El desarrollo de más misiones de exploración a Marte y de nuevos experimentos *in situ* serían la manera más eficaz de determinar su habitabilidad; sin embargo, tales misiones son muy costosas y conllevan un alto riesgo de contaminación biológica indeseada. Lo más práctico es continuar analizando y discutiendo los datos recolectados por las sondas y telescopios, y realizar experimentos en la Tierra con condiciones análogas a las presentes en Marte, que permitan dar un veredicto sobre su habitabilidad; o bien, discriminar entre los posibles objetivos específicos de futuras misiones a Marte y seleccionar los análisis *in situ* a realizar.

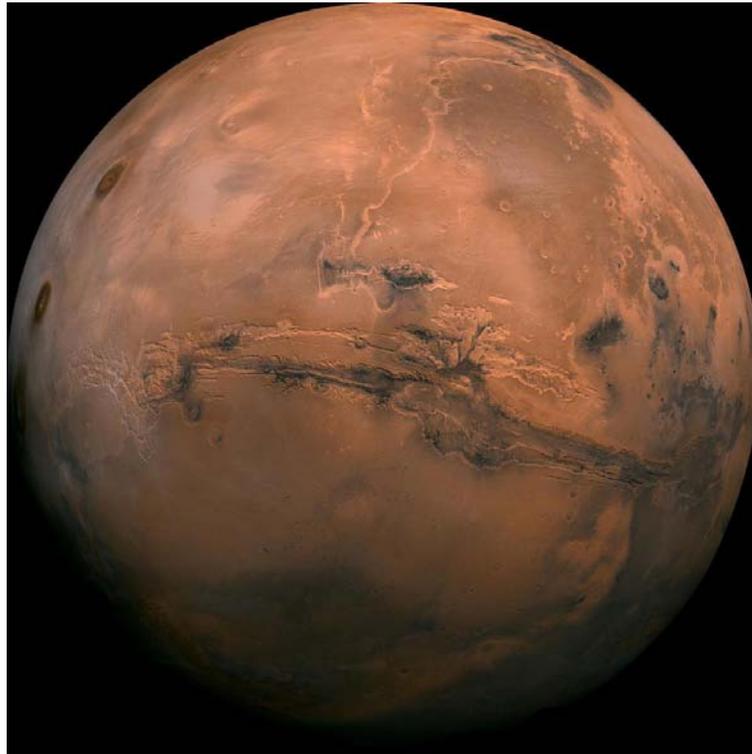


FIG. 1. Mosaico compuesto de 102 imágenes de Marte tomadas por el *Viking Orbiter*.

Imagen tomada de: <http://mars.nasa.gov/allaboutmars/extreme>

El estudio de organismos bajo condiciones análogas, es decir, cómo organismos terrestres reaccionan en condiciones que simulan los ambientes de otros planetas o satélites, es una de las principales herramientas en el campo de la astrobiología, y es crucial para desarrollar hipótesis más precisas sobre la existencia la vida extraterrestre y cómo ésta podría ser. Además, es importante en la determinación de qué tan probable es que la vida terrestre pueda adaptarse y sobrevivir en Marte o en otro planeta en un evento de colonización o *panspermia*

inversa (ver Sección 2.5), o incluso en el caso de contaminación terrestre durante una exploración espacial.

En las últimas décadas, las misiones espaciales se han convertido en una posible fuente de propagación de microorganismos entre planetas (Berry *et al.*, 2010; Onofri *et al.*, 2012). Como mencionan Olsson-Francis y Cockell (2010), estudiar la resistencia de microorganismos en el espacio y en condiciones extraterrestres simuladas, es crucial para evitar una contaminación biológica accidental que podría tener un impacto irreversible en sistemas ecológicos (si es que los hay) en otros planetas, como Marte.

Por lo tanto, si bien experimentos como los realizados en la presente tesis son de carácter biológico, son una pieza fundamental de las ciencias planetarias para la determinación de una característica de suma importancia, la habitabilidad.

2. TEORÍA

2.1. Planetas habitables

Para determinar si Marte es un planeta habitable o no, es importante primero definir el término “habitabilidad planetaria”. De acuerdo con Westall *et al.* (2013), el término de habitabilidad no debería restringirse a planetas (u otros cuerpos, como satélites) capaces de originar y albergar vida nativa, sino que debe ampliarse a su capacidad de sustentar vida exógena aun si no es capaz de originar la suya propia. Por lo tanto, un planeta o satélite podría considerarse como habitable si cumple con *al menos una* de las siguientes particularidades:

- Ser capaz de originar vida propia.
- Ser capaz de sustentar vida nativa o exógena, incluso en un estado latente.
- Organismos vivos nativos o exógenos pueden reproducirse y realizar funciones biológicas (reacciones metabólicas) en él.

Dado que la teoría exacta detrás del origen de la vida en la Tierra sigue siendo un problema sin resolver, no hay manera precisa de discernir si Marte cumple el primero de esos tres puntos, salvo por el supuesto de que el origen de la vida en un cuerpo fuera de la Tierra es posible si existen en él las condiciones que había en la Tierra durante el origen de la vida (esta es una de las dos corrientes de pensamiento

principales sobre el origen de la vida en el universo; la otra corriente sugiere que la vida en el universo es sumamente improbable) (Scharf, 2009). Esta hipótesis es la razón por la cual se buscan evidencias de que Marte y la Tierra fueron similares en alguna época pasada.

Sin embargo, el segundo y tercer punto pueden analizarse mediante experimentos factibles en la Tierra, simulando condiciones marcianas y sometiendo organismos terrestres a ellas. Si éstos son capaces de sobrevivir al ambiente de Marte, se cumpliría entonces al menos uno de los tres puntos y podría considerarse un planeta habitable. También, si se descubre que Marte en algún momento pudo originar vida propia, y además es capaz de sustentar vida exógena, la posibilidad de que seres nativos hayan sido capaces de sobrevivir hasta la actualidad no parecería tan improbable.

Para que la vida como la conocemos haya podido originarse, se requiere, entre otros, cuatro ingredientes principales (Gorbushina, 2003; Ollivier *et al.*, 2009; Scharf, 2009; Kasting, 2010; Westall *et al.*, 2013; Cockell, 2014; Dvorak *et al.*, 2015; Martín-Torres *et al.*, 2015; Stern *et al.*, 2015):

- *El planeta debe ser rocoso*: Debe tener una superficie sobre la cual los organismos puedan subsistir, o bien, sobre la cual puedan existir cuerpos de agua líquida.
- *Agua líquida*: Esencial para el desarrollo de la vida como la conocemos, y necesaria como disolvente para las reacciones químicas

y bioquímicas. Comprender la formación de planetas con agua es fundamental.

- *Fuente de energía*: En el caso de un planeta o satélite en la Zona Habitable, esta fuente generalmente será la estrella huésped. Sin embargo, esta fuente también puede ser de origen geológico o químico.
- *Elementos biogénicos*: Aquellos que son necesarios para la vida. Los principales elementos biogénicos son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre (el clásico CHONPS); preferentemente si se encuentran en forma de moléculas orgánicas o prebióticas. También se requiere de otros importantes elementos, metales como el hierro, etc.

Se considera que una estrella que nazca en un ambiente con suficiente metalicidad, producirá planetas rocosos con elementos biogénicos, puesto que éstos son relativamente abundantes en el medio interestelar reciclado, si se les compara con otros elementos pesados (Scharf, 2009).

Sin embargo, para cumplir con el requisito de poseer agua líquida, generalmente se requiere que el planeta se encuentre dentro de la Zona Habitable.

La Zona Habitable está definida como aquella región alrededor de la estrella huésped donde los planetas pueden poseer agua líquida, dada la energía que están recibiendo de su estrella, su presión atmosférica y el efecto invernadero que los

planetas presenten (Ollivier *et al.*, 2009; Scharf, 2009; Kasting, 2010; Kane, 2014; Oshi y Kamaya, 2016). Muy cerca de la estrella, y con alto efecto invernadero, el agua se evaporará, o incluso se disociará y el hidrógeno libre escapará de la atmósfera. Por otro lado, entre más lejos se encuentre el planeta de la estrella y con un bajo (o nulo) efecto invernadero, el agua se congelará. De este modo, estos factores definen las fronteras de la Zona Habitable:

- *Frontera interna:* Cerca de la estrella, mínimo efecto invernadero. Sin embargo, en un planeta con agua, el efecto invernadero llega a un punto crítico en una temperatura aproximada de 550 K, en la cual el vapor de agua en la atmósfera crea un efecto invernadero retroalimentativo desenfrenado que rápidamente agota el agua del planeta. A este punto crítico se le conoce como *Runaway Greenhouse Effect*.
- *Frontera externa:* Lejos de la estrella, máximo efecto invernadero. Al estar más lejos de la estrella, el planeta necesita un mayor efecto invernadero para poder conservar su calor. Cruzando esta frontera, toda el agua del planeta estará congelada y no se podrá disponer de ella como disolvente en las reacciones químicas.

La importancia de la Zona Habitable ha sido considerada desde hace décadas, siendo originalmente llamada “el cinturón de agua líquida” en los años cincuentas (Kasting, 2010). Aunque actualmente se sabe que otros cuerpos (planetas o

satélites) son capaces de mantener agua líquida mediante otros tipos de energía (geológica, fuerzas de marea, etc.), encontrar planetas dentro de la Zona Habitable sigue siendo más práctico.

La Zona Habitable de una estrella depende de su temperatura efectiva; y por consiguiente, de su tipo espectral y la etapa de su vida. Generalmente se considera una Zona Habitable Continua (ZHC) aquella que perdura mientras la estrella se encuentra en su etapa de Secuencia Principal (Ollivier *et al.*, 2009). Una estrella más masiva (más caliente) tendrá una ZHC más alejada de sí y de menor tiempo de duración, mientras que una estrella menos masiva (más fría) tendrá una ZHC más cercana y de mayor tiempo de duración.

El tiempo tan largo que una estrella de baja masa pasa en su secuencia principal permitiría, en un escenario similar al de la Tierra, que la vida surgiera y evolucionara en sus planetas. Además, su menor flujo de radiación ionizante es también una ventaja para la formación de moléculas orgánicas complejas. Sin embargo, Lammer *et al.* (2015) consideran que estrellas de tipo espectral K tardío y M (las de menor masa) no poseerían planetas en su Zona Habitable capaces de desarrollar una biosfera como la de la Tierra, debido a la cercanía entre la estrella y el planeta. A distancias menores de 0.3 UA la atmósfera del planeta sería severamente afectada por los vientos estelares y eyecciones de masa coronal de la estrella. Por lo tanto, estrellas de tipo espectral G (como el Sol) o de un tipo K más temprano, son mejores candidatas para albergar planetas con vida.

La Fig. 2 muestra las fronteras de la ZHC en función de la masa de la estrella central (Ollivier *et al.*, 2009).

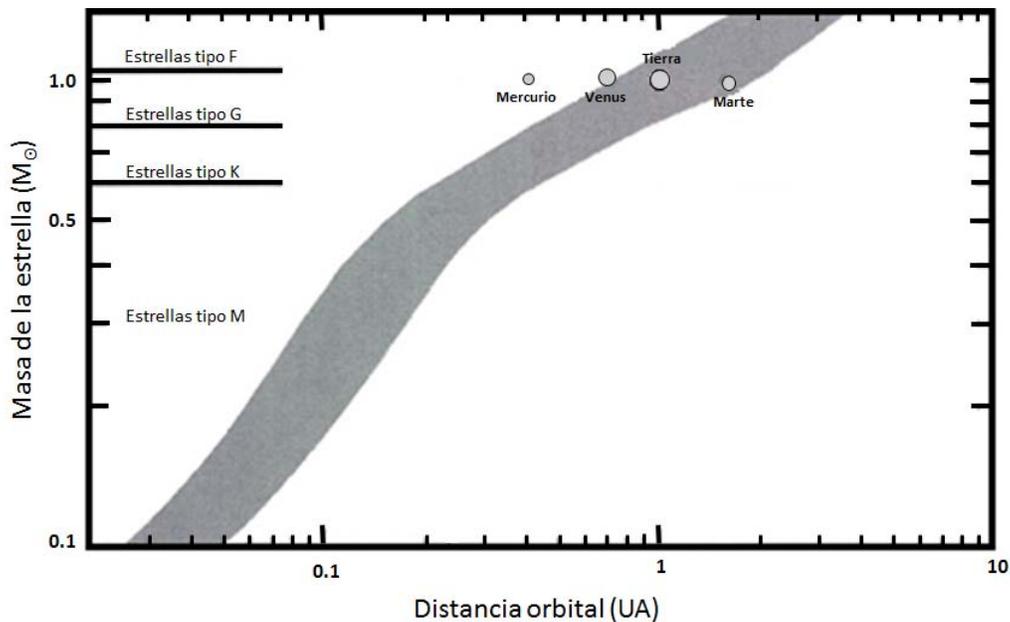


FIG. 2. Fronteras de la ZHC (distancia orbital en UA) en función de la masa de la estrella central (en masas solares). Imagen tomada y adaptada de Ollivier *et al.* (2009), p. 236.

El hecho de que Marte no parezca ser habitable actualmente, a pesar de encontrarse dentro de la Zona Habitable, se debe, principalmente, a una ausencia de campo magnético. Éste le hubiera ayudado a retener una atmósfera más densa y, por lo tanto, a mantener una temperatura superficial más cálida (Ollivier *et al.*, 2009; Jakosky *et al.*, 2015; National Aeronautics and Space Administration, 2015).

Para poder encontrar un planeta con vida, se parte de la premisa de que ésta será *vida como se conoce* (con características similares a la de la Tierra), por lo que se podría detectar a través de los cambios que la biosfera produce en la atmósfera y la superficie del planeta, es decir, bioseñales (Scharf, 2009; Cockell, 2014).

Sin embargo, Cockell (2014) considera que también existe la posibilidad de que tales bioseñales en planetas habitables no puedan ser identificadas por algunos factores, como:

- El planeta es habitable, pero no tiene vida.
- El planeta tiene vida, pero carece de bioseñales detectables de ese tipo de vida en la superficie.
- El planeta tiene vida, pero no se puede distinguir si las bioseñales de la atmósfera son causadas por la biota o por procesos abióticos, debido a la falta de conocimiento de las condiciones del planeta (o de la forma de vida existente).

Actualmente, la única bioseñal detectada en Marte es el gas metano (Forminaso *et al.*, 2004; Kasting, 2010); sin embargo, aún no se ha podido determinar si es de origen biológico o abiótico.

2.2. Marte como sitio de interés astrobiológico

Considerando la sección anterior, resulta evidente que Marte posee particularidades que lo convierten en un sitio de alto interés astrobiológico, y a pesar de las condiciones aparentemente severas que el planeta presenta para la vida terrestre (ver Sección 2.3), no se puede catalogar a Marte como un planeta no-habitable en base a ellas.

Marte es un planeta rocoso que se encuentra en la frontera exterior de la Zona Habitable del Sistema Solar, y existe una creciente evidencia de que, en el pasado, Marte era más cálido y húmedo, con propiedades físicas y químicas similares a las de la Tierra (McKay y Davis, 1991; Mancinelli, 1998; Horneck, 2008). En Marte se encuentran todos los elementos biogénicos indispensables para el origen de la vida (Mancinelli, 1998; Westall *et al.*, 2013), y, asimismo, posee moléculas orgánicas como metano, clorobencenos y dicloroalcanos (Formisano *et al.*, 2004; Freissinet *et al.*, 2015) (véase Sección 2.4), que si bien no son por sí solas una prueba concluyente de vida presente o pasada en Marte, sí indican que existen en el planeta compuestos de carbono en forma que pueden ser aprovechados por organismos vivos. Por lo tanto, a pesar de que el Marte actual parece tener un ambiente bastante hostil para la vida, todo indica que durante algunos periodos de su historia ha cumplido los requisitos para originar y albergar vida.

En la Tierra, la presencia de la vida está estrechamente ligada con el agua líquida, por lo que determinar la existencia de ambientes acuáticos en el Marte actual o antiguo es crucial. Pero su simple existencia no es suficiente. Es necesario que tales ambientes acuáticos hayan podido perdurar el tiempo suficiente para el origen y evolución de la vida. Algunos autores (*e.g.*, McKay y Davis, 1991; Horneck, 2008; Taubner *et al.*, 2015; y referencias dentro de ellos) consideran que en el Marte primigenio existía agua líquida en grandes cantidades, y por lo tanto pudo ser un planeta habitable. En un estudio de Tosca y Knoll (2009), se concluyó que a lo largo de su historia, y en muchas regiones de planeta, Marte, tuvo amplios cuerpos de agua líquida, pero estos estuvieron presentes de forma episódica, no persistente. Desafortunadamente, al tener un solo ejemplo de origen de la vida (la de la Tierra), no es posible definir si las escalas de tiempo de estos episodios de agua líquida de unos pocos millones de años, fueron suficientes para que la vida emergiera.

Todo lo anterior da indicios de que Marte es o fue un planeta habitable, de acuerdo a la definición anteriormente expuesta (Sección 2.1). Sin embargo, aún hay que considerar todas las condiciones adversas que presenta: bajas temperaturas y presiones atmosféricas, intensa radiación ultravioleta, la falta de un campo magnético, etc., que se discuten en la sección siguiente. Afortunadamente, a pesar de las condiciones que están presentes de manera general en todo el planeta, existen o pueden existir regiones especiales donde algunos organismos terrestres podrían

sobrevivir y propagarse (Berry *et al.*, 2010; Schuerger *et al.*, 2013). Este tipo de regiones especiales pueden ser casquetes polares, permafrost, salmueras subterráneas y áreas de actividad hidrotermal (Schuerger *et al.*, 2013).

Marte también es importante en el área de la astrobiología y de las ciencias planetarias porque es un planeta cercano en el que pueden realizarse experimentos cuyos resultados pueden aplicarse como analogías de exoplanetas, y podrán compararse cuando, en un futuro cercano, puedan estudiarse sus atmósferas. Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Cockell y Raven (2004), en donde se utilizó a Marte como un planeta modelo carente de capa de ozono para examinar cuantitativamente la existencia de zonas de potencial fotosintético en otros planetas igualmente anóxicos.

2.3. Condiciones en la superficie de Marte

El principal problema que presenta Marte para considerarlo un planeta habitable, son sus condiciones actuales hostiles para la vida como la conocemos.

La temperatura en la superficie de Marte varía en un rango típico de -140°C a 30°C , con una media aproximada de -65°C (National Aeronautics and Space Administration, s.f.). Su temperatura media, aunada a una presión atmosférica media en la superficie de 560 Pa, según Horneck (2008), u 800 Pa según Mancinelli (1998), no permiten que el agua líquida perdure durante largos periodos. Esta es una condición importante, pues, como se mencionó anteriormente, el agua líquida es una pieza clave para la existencia de la vida (Ollivier *et al.*, 2009; Kasting, 2010; Dvorak *et al.*, 2015; Martín-Torres *et al.*, 2015).

No obstante, en un artículo reciente (Ojha *et al.*, 2015) se mostró evidencia de actividad contemporánea de agua líquida en Marte, a través de observaciones espectrales de líneas de pendiente periódicas (*recurring slope lineae*). Estas líneas de pendiente son similares a ríos, y se denominan periódicas debido a que se ha observado que su morfología varía de manera cíclica en Marte, como si fuera el efecto de estaciones del año. Las observaciones espectrales indicaron la presencia de clorato de magnesio, perclorato de magnesio y perclorato de sodio en disoluciones acuosas. Esto sugiere que disoluciones salinas de alta concentración (salmueras) pueden ser la clave para mantener el agua en estado líquido: las sales

disminuyen el punto de fusión del agua hasta una temperatura de -190°C y algunas de ellas son sumamente higroscópicas (absorben la humedad de la atmósfera y la estabilizan en forma líquida). Martín-Torres *et al.* (2015) determinaron, gracias al vehículo explorador *Curiosity*, que el estado de hidratación de los percloratos decrecía conforme aumentaba la profundidad del suelo, de manera consistente a un intercambio de agua entre la atmósfera y las sales de la superficie. Además, debido a que los percloratos están ampliamente distribuidos por toda la superficie de Marte, es probable que los cuerpos hídricos de salmueras sean abundantes (Navarro-González *et al.*, 2006). Sin embargo, hasta que no se conozca más acerca de la hidrografía marciana, las evidencias pasadas sugieren que la sequedad extrema es un problema al menos en la mayor parte de la superficie del planeta (*e.g.*, Tosca y Knoll, 2009; Schuerger *et al.*, 2013; Taubner *et al.*, 2015).

La sequedad es probablemente una de las condiciones más adversas en Marte, ya que todos los seres vivos conocidos dependen de la presencia de agua líquida y se cree que lo mismo aplica para todas las posibles formas de vida del Sistema Solar (Gorbushina, 2003). Sin embargo, ni las bacterias ni las arqueas son especialmente resistentes ante altos niveles de este parámetro, siendo en su lugar algunas especies de hongos las más adecuadas para sobrevivir en ambientes secos (Sterflinger *et al.*, 2012). Otro factor que dificulta la viabilidad en Marte es la radiación ultravioleta. Las radiaciones UV-B ($280\text{ nm} < \lambda < 320\text{ nm}$) y, principalmente, UV-C ($\lambda < 280\text{ nm}$) son extremadamente dañinas para los seres vivos. Tanto la radiación

ultravioleta como la desecación (o sequedad) causan, entre otros daños, deterioros directos al ADN (Jansen *et al.*, 1998; Mileikowsky *et al.*, 2000; Bauermeister *et al.*, 2011; Smith, 2013). Se han realizado estudios acerca de la interacción entre estos dos parámetros (radiación UV y sequedad), y se ha observado que sus efectos negativos ante los organismos afectados interactúan entre sí de diferentes maneras: según sea el caso, los efectos puede ser aditivos (los efectos se suman), sinérgicos (sus efectos son más intensos que la suma de los efectos por separado) o antagónicos (los efectos se anulan o minimizan, hasta cierta medida, el uno al otro), siendo estas relaciones estudiadas principalmente en plantas (Balakumar *et al.*, 1993; Turtola *et al.*, 2006; Kubiś y Rybus-Zajac, 2008; Bandurska *et al.*, 2013). Por otro lado, también se ha sugerido que la radiación UV a largos periodos puede llegar a ser más peligrosa en ambientes de sequedad, ya que la ausencia de agua líquida impide a ciertos organismos reparar los daños que la radiación le causa (Bauermeister *et al.*, 2011).

En la Tierra, las radiaciones UV-B y UV-C son parcial o totalmente absorbidas por la atmósfera. Sin embargo, en Marte están presentes con tasas de flujo significativas, como se ilustra en la Fig. 3 (Patel *et al.*, 2002; Córdoba-Jabonero *et al.*, 2003; Horneck, 2008).

La atmósfera de Marte es mucho más delgada que la de la Tierra, y está constituida principalmente por CO₂. La ausencia de una capa de ozono tiene como consecuencia una exposición a la radiación más intensa y letal para los organismos,

a menos que se escuden de alguna forma (por ejemplo, usando partículas de polvo) (Mancinelli, 1998). Cockell y Raven (2004) consideran que el flujo de radiación UV podría ser irrelevante en una biósfera subterránea, e incluso algunos organismos podrían sobrevivir con sólo la protección de unos cuantos milímetros de polvo marciano.

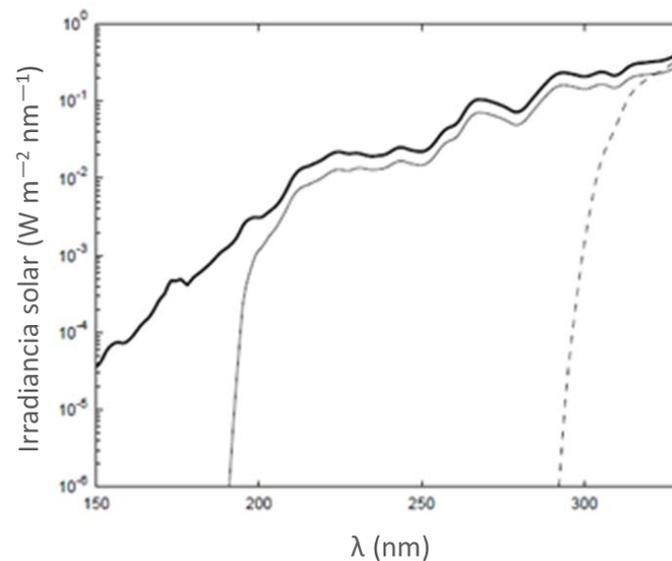


FIG. 3. Irradiancia solar UV en la cima de la atmósfera de Marte (**línea sólida gruesa**), en la superficie de Marte (**línea sólida delgada**), y en la superficie de la Tierra (**línea punteada**).

Imagen tomada de Córdoba-Jabonero *et al.* (2003).

Marte no posee un campo magnético que proteja a su atmósfera de los vientos solares. Si en el pasado poseyó una atmósfera mucho más densa y parecida a la de la Tierra, la perdió con el paso del tiempo. Las mediciones del orbitador MAVEN

de la NASA indican que cada segundo, 100 gramos de la atmósfera de Marte escapan al espacio exterior por interacción del planeta con los vientos solares (Jakosky *et al.*, 2015; National Aeronautics and Space Administration, 2015).

También, debido a la ausencia de campo magnético y a su atmósfera delgada, los rayos cósmicos pueden propagarse e interactuar con la superficie marciana con mayor intensidad que en la superficie de la Tierra (Mitrofanov *et al.*, 2002). Los rayos cósmicos son partículas cargadas, principalmente protones y partículas alfa, que son aceleradas hasta velocidades relativistas (Ferrari y Szuszkiewicz, 2009). Al igual que la radiación electromagnética de alta energía, los rayos cósmicos resultan dañinos para los organismos vivos y la materia orgánica en general.

Con respecto al análisis del suelo de las sondas *Viking* y *Phoenix*, se detectó un pH ligeramente alcalino en el suelo marciano, alrededor de 8 y 7.7 ± 0.5 , respectivamente (Schuerger *et al.*, 2012). Certini *et al.* (2009) define la palabra *suelo (soil)* como el material en la superficie de un cuerpo planetario que ha sido biogeoquímicamente o geoquímicamente alterado, constituido generalmente de depósitos superficiales telúricos, y que retiene información sobre su historia ambiental. Los valores de pH del suelo marciano medido por estas sondas son catalogados como “ligeramente alcalinos” y “moderadamente alcalinos” por el USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), y no parecen ser, en un inicio, un problema para la vida como la conocemos, ya que si bien muchos de los organismos terrestres prefieren suelos neutros o ligeramente ácidos, valores

similares pueden encontrarse en muchas regiones de la Tierra distribuidas alrededor del mundo (Batjes, 1995; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, s.f.). Además, estos valores podrían ser típicos y representativos para todo el planeta, pues observaciones sugieren que la capa más externa del suelo que cubre la superficie de Marte es químicamente homogénea (al menos para la mayoría de los elementos) a nivel global, debido al mezclado que provocan las fuertes tormentas de polvo (Mancinelli, 1998). En Marte, las tormentas de polvo son muy comunes, y pueden incluso llegar a cubrir todo el planeta (Cantor, 2007).

Además de sus condiciones físicas, geológicas y atmosféricas, en el suelo marciano figuran algunos factores de carácter químico que son considerados como biocidas. Entre ellos se encuentran, oxidantes volátiles producidos por la radiación UV (*e.g.*, O_2^- , O^- , H_2O_2 , NO_x , O_3), altos niveles de salinidad (*e.g.*, $MgCl_2$, $NaCl$, $FeSO_4$, $MgSO_4$) y altas concentraciones de metales pesados (Schuerger *et al.*, 2013).

2.4. Elementos biogénicos y moléculas orgánicas en Marte

En lo que respecta a los elementos biogénicos encontrados en Marte, los datos de la misión *Viking* indican que éstos existen en concentraciones similares (C, S, Zn, Cu, Co), más altas (Ca, Mg, P, Fe, Mn), o ligeramente menores (H, O, K, Mo, I) a las presentes en la Tierra (Mancinelli, 1998); es decir, todos los ingredientes para la vida, en su forma más básica, existen en el suelo marciano, incluyendo el nitrógeno, aunque éste no fuera detectado hasta varios años después con el instrumento SAM (*Sample Analysis at Mars*, Análisis de Muestras en Marte) del *Curiosity*. El nitrógeno en Marte fue encontrado en el suelo marciano en forma de diversas moléculas como cianuro de hidrógeno (HCN), cloruro de cianógeno (ClCN), otras más complejas como trifluor-N-metil-acetamida, pero, principalmente, en forma de óxido nítrico (NO) (Stern *et al.*, 2015). En la Tierra, el nitrógeno es fijado de manera biológica por bacterias, y aunque Stern *et al.* (2015) proponen métodos de fijación abióticos por choques térmicos (relámpagos, vulcanismo o impactos de meteoritos), también indica que la presencia de estas moléculas en Marte puede ser evidencia de un ciclo de nitrógeno primitivo en Marte, en donde pudo haber actuado como una fuente bioquímicamente accesible para organismos.

En una época anterior al *Curiosity*, se había reportado la ausencia de moléculas orgánicas complejas en la superficie de Marte. La ausencia o escasez de

éstas se atribuyeron a una serie de agentes químicos capaces de degradarlas a compuestos más simples y volátiles (Westall *et al.*, 2013). Uno de esos agentes son los iones radicales superóxidos O_2^- , que hacen al suelo de Marte extremadamente oxidante (Yen *et al.*, 2000).

Sin embargo, pese a la presencia de estos agentes oxidantes, Navarro-González *et al.* (2003) consideraron que los resultados de los *Viking* con respecto a las moléculas orgánicas podrían no ser concluyentes debido a razones técnicas. Demostraron que la temperatura de volatilización a la que funcionaba el GC-MS (*Gas Chromatography—Mass Spectrometry*, cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas) era menor a la requerida para degradar ciertas moléculas a compuestos más simples en cantidades detectables.

Finalmente, en la presente década, fueron detectados en el suelo marciano dicloroalcanos y clorobenzenos con el GC-MS del SAM (*Curiosity*), moléculas orgánicas que, se sugiere, son producto de reacciones entre el cloro marciano y carbono orgánico, cuya fuente puede ser marciana (volcánica, hidrotermal, atmosférica o biológica) o exógena (meteoritos, cometas, o polvo interplanetario) (Freissinet *et al.*, 2015).

La detección de moléculas orgánicas en Marte es importante para determinar las mejores ubicaciones para realizar futuros experimentos *in situ* de detección de vida (Navarro-González *et al.*, 2010).

Durante la década pasada, trazas de metano fueron detectadas (entre 0 y 30 partes por mil millones en volumen) en la atmósfera de Marte por Formisano *et al.* (2004), y desde entonces han sido detectadas en varias ocasiones con espectrógrafos en telescopios terrestres, y más recientemente por el vehículo explorador *Curiosity* (Fonti *et al.*, 2015; Webster *et al.*, 2015; Bak *et al.*, 2016). El metano es una molécula de corto tiempo de vida (100-300 años) en la atmósfera debido a que se fotodisocia al ser muy vulnerable a la radiación ultravioleta, por lo que su presencia en Marte sugiere que debe existir alguna fuente actual, geológica o biológica, de producción de metano aún no identificada (Mumma *et al.*, 2009). Dado que en la Tierra el 90% del metano de la atmósfera es producido por fuentes biológicas (Guzmán-Marmolejo y Segura, 2015), es imperativo determinar la fuente en Marte; si bien su presencia no es por sí sola una prueba de vida, es un indicio que no puede ser ignorado. Curiosamente, se ha observado que los niveles de metano en la atmósfera marciana tienen una variación muy singular en el tiempo, de manera episódica a lo largo de decenas de días marcianos (Fonti *et al.*, 2015; Webster *et al.*, 2015). Estos eventos de corta duración indican que el metano es producido de manera local en cierto punto de la superficie de Marte, para luego dispersarse en la atmósfera, y se ha propuesto que esta producción puede deberse a una combinación de mecanismos, que podrían incluir metanogénesis (producción de metano por microorganismos llamados metanógenos) o por la liberación desde antiguos depósitos (Webster *et al.*, 2015).

Un estudio realizado por Bak *et al.* (2016) propone que los metanos clorinados, detectados en la superficie de Marte por el instrumento SAM del *Curiosity*, puede tener su origen en un proceso donde primeramente el metano de la atmósfera reacciona y es capturado por los silicatos del suelo, convirtiéndose en silicatos metilados; y posteriormente éstos reaccionan por volatilización térmica (debido al instrumento mismo, al realizar los experimentos de detección por espectrometría) con los compuestos percloratos que se encuentran también en el suelo marciano. La presencia de orgánicos y percloratos en el suelo de Marte como explicación de los metanos clorinados ya había sido sugerida anteriormente por Navarro-González *et al.* (2010).

Los silicatos metilados podrían ser una fuente importante de carbono orgánico que podría ser aprovechado por microorganismos (Bak *et al.*, 2016).

2.5. Evento de litopanspermia o panspermia inversa

Además de la contaminación biológica en misiones de exploración espacial, otra de las formas en la que vida exógena pueda viajar de un planeta a otro (sea, de la Tierra a Marte), es vía panspermia.

Se denomina panspermia a la hipótesis que sugiere que la vida en la Tierra llegó del espacio exterior (Wickramasinghe y Trevors, 2013). Cuando se aplica al caso inverso, es decir, que la vida haya podido salir de la Tierra hacia otros planetas, se conoce como *panspermia inversa* (Cull, 2007; Nuñez *et al.*, en preparación), y *litopanspermia* cuando fragmentos de roca son el mecanismo de dispersión (Onofri, *et al.*, 2012; Worth *et al.*, 2013).

Varios estudios se han enfocado en la posibilidad de que organismos hayan podido ser transportados vía litopanspermia desde la Tierra a otros cuerpos en el Sistema Solar, cuando impactores (meteoritos o cometas) chocan contra la Tierra y causan la eyección de partículas terrestres (*e.g.*, Melosh, 1988; Mileikowsky *et al.*, 2000; Wells *et al.*, 2003; Reyes-Ruiz *et al.*, 2012; Worth *et al.*, 2013). Steffen y Li (2016), consideran que en un sistema multihabitable (sistemas planetarios con más de un planeta en la Zona Habitable) los eventos de panspermia serían comunes. Al encontrarse Marte en la región externa de la Zona Habitable, según algunos autores (*e.g.*, Horneck, 2008; Ollivier *et al.*, 2009), el Sistema Solar adquiere un estatus de sistema multihabitable. Es importante mencionar que Steffen y Li (2016) no

consideran en su estudio al Sistema Solar como un sistema multihabitable. No obstante, el intercambio de material con Marte es especialmente importante debido a las características de Marte ya mencionadas (sección 2.2).

Estudios de Reyes-Ruiz *et al.* (2012) demostraron, mediante simulaciones numéricas, que material eyectado de la Tierra puede ser transferido a Marte, si es despedido con una velocidad tan sólo 5% mayor a la velocidad de escape de la Tierra. Worth *et al.* (2013) estimaron, mediante cálculos similares a los de Mileikowsky *et al.* (2000) y con datos de Ivanov and Hartmann (2007), que en los últimos 3.5 Ga alrededor de 360000 fragmentos de material (equivalentes a unos 1.2×10^{11} kg) eyectados de nuestro planeta, y con condiciones adecuadas de tamaño, temperatura y presión para transportar organismos vivos, podrían haber terminado en Marte. En tal material, materia biológica, como granos de polen y esporas fúngicas pueden estar adheridas a arcillas (Nuñez *et al.*, en preparación). Además, las partículas eyectadas pueden proveer calor y protección contra la radiación UV a los organismos o material biológico durante un proceso de litopanspermia (Onofri *et al.*, 2008).

Mileikowsky *et al.* (2000) sugieren que la impresionante resistencia de los microbios a los peligros de un viaje espacial permite que su transferencia viable entre Marte y la Tierra no sea sólo posible, sino también altamente probable si existe un alto intercambio de meteoritos, como lo hubo en el Bombardeo Intenso Tardío (Wells *et al.*, 2003; Worth *et al.*, 2013).

2.6. *Extremófilos y hongos como evidencia de la posible habitabilidad en Marte*

Hace sólo unas décadas atrás, se consideraba altamente improbable que un ambiente tan “hostil” como el de Marte (bajas temperaturas, intensa radiación ultravioleta, sequedad, etc.) pudiera albergar vida como se conoce; sin embargo, en las últimas décadas se ha incrementado considerablemente el entendimiento científico sobre el potencial que tienen otros planetas y satélites de albergar vida (Westall *et al.*, 2013). Estudios en el creciente campo de la astrobiología señalan que, a pesar de las adversas condiciones en la superficie marciana, algunos microorganismos, como bacterias, podrían ser buenos candidatos para sobrevivir en Marte (*e.g.*, Schuerger y Nicholson, 2006; Schuerger *et al.*, 2006; Berry *et al.*, 2010; Gómez *et al.*, 2010; Moeller *et al.*, 2012; Bauermeister *et al.*, 2014).

Wallis y Wickramasinghe (2004) indican que las hipótesis que conciernen a la panspermia requieren del transporte de microorganismos de una manera viable de una localidad astronómica a otra. Con raras excepciones, los organismos complejos son menos resistentes a condiciones extremas, siendo los microorganismos, y en particular aquellos conocidos como extremófilos, los mejores candidatos a sobrevivir en un evento de panspermia o colonización. El estudio de los extremófilos es útil para revelar los requerimientos fisiológicos para

la supervivencia de organismos terrestres en el espacio y en ambientes extraterrestres (Olsson-Francis y Cockell, 2010).

Los extremófilos son organismos capaces de sobrevivir en ambientes con condiciones muy alejadas a las óptimas para la vida humana. A continuación se enlistan tipos de extremófilos (Scharf, 2009):

- *Acidófilos*: Organismos que viven en ambientes con $\text{pH} \leq 3$.
- *Alcalófilos*: Organismos que viven en ambientes con $\text{pH} \geq 9$.
- *Barófilos*: Organismos que viven a presiones típicamente mayores a 380 atmósferas.
- *Endolitos*: Organismos que viven en fisuras microscópicas en rocas.
- *Halófilos*: Organismos que viven en concentraciones de sal mayores a 2 moles por litro de agua.
- *Termófilos*: Organismos que viven a temperaturas mayores a 60°C . Si viven a temperaturas mayores a 80°C , se les considera Hipertermófilos.
- *Hipolitos*: Organismos que viven dentro de rocas en desiertos fríos.
- *Litoautótrofos*: Organismos que adquieren su energía a través de minerales (se diferencia de los fotoautótrofos y heterótrofos).
- *Metalotolerantes*: Organismos que viven en ambientes con altas concentraciones de metales pesados (cobre, cadmio, zinc, arsénico, etc.).

- *Oligotróficos*: Organismos que viven en ambientes con escasez de nutrientes.
- *Psicrófilos*: Organismos que viven a bajas temperaturas, hasta -20°C .
- *Radiorresistentes*: Organismos que pueden soportar altos niveles de radiación ionizante, incluyendo radiación UV y partículas alfa.
- *Xerófilos*: Organismos que viven en ambientes de extrema sequedad.

Algunas especies de hongos son consideradas como extremófilas por muchos autores (e.g., Gunde-Cimerman *et al.*, 2003; Stierle *et al.*, 2006; Selbmann *et al.*, 2011, 2013; Sterflinger *et al.*, 2012; Zajc *et al.*, 2014; Zakharova *et al.*, 2014), debido a la resistencia que presentan ante severas condiciones de temperatura, pH, salinidad y radiación. Distintos géneros de hongos, tales como *Penicillium* y *Cladosporium*, han sido encontrados en pedazos flotantes de hielo glaciar, en fiordos (Gunde-Cimerman *et al.*, 2003) y en permafrost antártico (Kochkina *et al.*, 2012), quizá similares a los permafrost en Marte.

Otros géneros pueden resistir medios con alta alcalinidad, con valores de pH de hasta 11 (Selbmann *et al.*, 2013), y ambientes de alta salinidad. Gunde-Cimerman *et al.* (2003) reportó que especies del género *Penicillium* pueden soportar concentraciones de NaCl de hasta 24%, mientras que Zajc *et al.* (2014) indicó que algunas especies de los géneros *Hortaea*, *Erotium*, y *Wallemia* pueden sobrevivir en concentraciones de 2.1 M (molar) para MgCl_2 y 2.0 M para CaCl_2 .

De acuerdo a los nuevos descubrimientos sobre la presencia de agua líquida en forma de salmueras en Marte (*e.g.*, Ojha *et al.*, 2015), la naturaleza halofílica o halotolerante de los hongos puede ser de mayor importancia de lo que se pensaba.

Además, se han observado especies de hongos que son capaces de crear mecanismos microcoloniales que les permiten sobrevivir en ambientes desérticos (*e.g.*, *Acrodictis sp.*, *Coniosporium sp.*, *Coniosporium uncinatum*, *Sarcinomyces sp.*, *Phaeococcomyces sp.*), donde ocurren cambios drásticos de temperatura, desecación y radiación UV intensa y persistente (Gorbushina, 2003). Estos ambientes corresponden a un perfil marciano.

Otra característica importante de los hongos es que pueden ser encontrados en forma de esporas que pueden ser aerotransportadas. Debido a los vientos y sistemas climáticos, el aire se mezcla con la superficie terrestre y aerosoles biológicos son arrastrados hacia la atmósfera, llevando consigo microorganismos como hongos o esporas (Smith, 2013).

En el caso de producirse un evento de litopanspermia debido a un impacto en la Tierra, el material de las capas más externas de la corteza terrestre se elevaría y podría alcanzar velocidades mayores a la velocidad de escape gracias a la interferencia de ondas de choque inducidas por el impacto mismo (Reyes-Ruiz *et al.*, 2012). Es de suponerse entonces que los gases atmosféricos podrían alcanzar también esas velocidades, por lo que el material atmosférico escaparía de la Tierra (Melosh, 1988); y, por consiguiente, es lógico inferir que microorganismos

aerotransportados pueden escapar al espacio exterior incluso con mayor probabilidad que los microorganismos terrestres. *Alternaria* y *Aspergillus*, géneros con los que se trabajaron en el presente estudio, son unos de los muchos géneros de hongos que se encuentran comúnmente en la atmósfera (O’Gorman, 2011; Martínez Blanco *et al.*, 2015; Sidel *et al.*, 2015; Nuñez *et al.*, en preparación).

Por otro lado, los hongos han sido sometidos a experimentos en el espacio, como es el caso de LIFE (Lichens and Fungi Experiments: Resistance of lichens and lithic fungi to space conditions), un experimento realizado durante 1.5 años en la Estación Espacial Internacional (Onofri *et al.*, 2009, 2012). Olsson-Francis y Cockell (2010) enlistan varios ejemplos de experimentos realizados en órbita terrestre baja y a bordo de la Estación Espacial Internacional, con microorganismos entre los cuales se incluyen las siguientes especies de hongos, líquenes y levaduras: *Aspergillus sp.*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Chaetomium globosum*, *Cryptococcus antarcticus*, *Cryptococcus minteri*, *Mucor plumbeus*, *Penicillium expansum*, *Penicillium roqueforti*, *Rhizocarpon geographicum*, *Rhodotorula mucilaginosa*, *Rhodotorula rubra*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces mitis*, *Sordaria fimicola*, *Thermomyces lanuginosus*, *Trichophyton terrestre*, *Ulocladium atrum*, *Xanthoria elegans*, *Xeromyces bisporus*, y *Zygosaccharomyces bailii*.

La tenacidad de los hongos ha sido ampliamente estudiada, y éstos han probado ser una de las formas de vida más resistentes. Estudiar la viabilidad de estos seres puede ser la clave para determinar si Marte es o no un planeta habitable.

2.7. Propuesta del presente estudio

Se pretende analizar la habitabilidad de Marte basándose en experimentos de viabilidad con extremófilos (en este caso, hongos) sometidos a ciertas condiciones similares a las presentes en el suelo marciano. Las condiciones a analizar son: pH alcalino, baja temperatura y radiación ultravioleta; tres de los principales obstáculos para la vida en Marte.

En un estudio reciente acerca de la viabilidad de granos de polen (Nuñez *et al.*, in preparation), algunas muestras fueron contaminadas con esporas de hongos (*Alternaria sp.*, *Aspergillus sp.* y *Penicillium sp.*), y se determinó que los éstas pueden estar presentes en las capas externas de los granos de polen y dentro de las aperturas existentes en sus estructuras. Asimismo, concluyeron que era posible que tales especies de hongos pudieran sobrevivir a las condiciones de los experimentos realizados.

Alternaria y *Aspergillus* son géneros de hongos bastante comunes que pueden encontrarse en el medio ambiente, y, como se mencionó en la sección anterior (2.6), son microorganismos aerotransportados (O’Gorman, 2011; Martínez Blanco *et al.*, 2015; Sidel *et al.*, 2015; Nuñez *et al.*, en preparación). Esto los hace posibles contaminantes en misiones de exploración espacial o en material eyectado en un evento de panspermia, por lo que determinar su capacidad de sobrevivir el viaje a Marte y su capacidad de sobrevivir en su superficie adquiere importancia. Además,

Aspergillus y *Alternaria* han demostrado ser capaces de sobrevivir ambientes extremos como los ambientes desérticos de Libia y Arabia Saudita y el Desierto de Atacama, siendo una de las regiones de la Tierra con condiciones de sequedad más parecidas a Marte (Sterflinger *et al.*, 2012). Algunas especies de *Aspergillus* también son consideradas halofílicas o halotolerantes (Sterflinger *et al.*, 2012; Zajc *et al.*, 2014), mientras que es sabido que los hongos maristemáticos negros, como *Alternaria*, se encuentran entre los eucariontes con mayor tolerancia a situaciones de estrés, donde sus condiciones son cambiadas drásticamente, y algunos son capaces de sobrevivir a altas y bajas temperaturas, radiación UV y condiciones del espacio (Selbmann *et al.*, 2013). En un estudio realizado por Ulevičius *et al.* (2004), *Aspergillus* y *Alternaria* sobresalieron entre otras especies como hongos aerotransportados con mejor índice de sobrevivencia en ambientes expuestos a radiación UV-B.

Los experimentos del presente estudio se enfocan en la sobrevivencia de estos hongos bajo condiciones de la superficie de Marte.

Los experimentos de supervivencia de microorganismos bajo condiciones aisladas específicas son esenciales para determinar qué condiciones afectan a cuáles organismos, y en qué medida; lo que ofrece una mejor perspectiva sobre las limitaciones de las hipótesis que involucran panspermia. Estos estudios también proveen información a considerar en las futuras misiones espaciales. Ya sea por colonización deliberada, por contaminación accidental durante las misiones

espaciales, o por un evento de panspermia inversa, la transferencia de material biológico, como microorganismos, es un importante problema real que no debe seguir siendo tratado como improbable, sino como una posibilidad que merece ser estudiada.

En el caso de determinarse que organismos extremófilos son capaces de sobrevivir al ambiente marciano, implicaría que Marte es potencialmente un planeta habitable, y por tanto, podría estar actualmente habitado por especies nativas, o bien, podría ser colonizado por especies exógenas (*e.g.*, terrestres).

Los presentes experimentos fueron realizados en el Laboratorio de Astrobiología del Instituto de Astronomía, UNAM, Ensenada.

3. MÉTODO

Se obtuvieron muestras de esporas fúngicas del medio ambiente en Ensenada, Baja California, dejando placas de Petri al aire libre. Los géneros *Aspergillus* y *Alternaria* (Figs. 4 y 5) fueron identificados morfológicamente y posteriormente aislados mediante una secuencia de inoculaciones en cultivo agar-agar de las colonias. Luego, se procedió a realizar los experimentos.

Las especies fueron sometidas a tres diferentes condiciones de pH: 7, 8 y 9; dos temperaturas: 28°C y -12°C; y tres tiempos de exposición a radiación UV-C, equivalentes a uno, dos y cinco minutos en Marte; con el objetivo de evaluar su viabilidad mediante la observación de su crecimiento en la placa de Petri antes y después del tratamiento.

El medio de cultivo fue preparado de la siguiente manera (Stanley *et al.*, 1974):

Por litro de agua:

- 20 gramos de agar-agar.
- 200 gramos de sacarosa.
- 0.1 gramos de ácido bórico.
- 0.1 gramos de nitrato de potasio.
- 0.1 gramos de nitrato de calcio.
- 0.1 gramos de sulfato de magnesio.

Las mediciones del crecimiento fueron realizadas analizando imágenes digitales con *Macnification*, un software de la compañía *Orbicule*. Los crecimientos medios (CMs) y las diferencias de crecimientos medios (DCMs) fueron obtenidos en unidades de fracción de área de placa de Petri (FAPP) ocupada por la colonia fúngica en crecimiento. Este método de medición de áreas es similar al método de medición de diámetro de colonias macroscópicas aproximadamente circulares, utilizado en múltiples experimentos como indicador de crecimiento de las colonias (e.g., Farooqi *et al.*, 1985; Wheeler *et al.*, 1991; Alborch *et al.*, 2011).

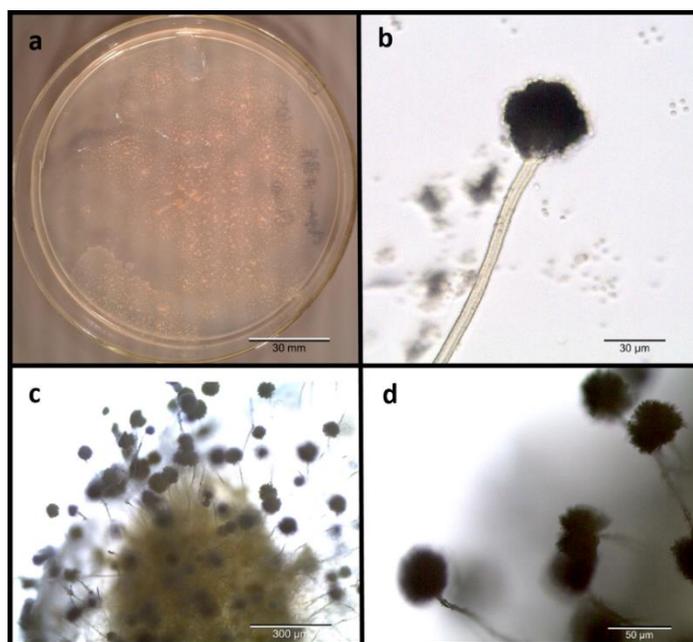


FIG. 4. *Aspergillus* spp. La figura muestra (a) una colonia en su placa de Petri, e imágenes tomadas con un microscopio Leica DM750, objetivos (b, d) 40x, y (c) 10x.



FIG. 5. *Alternaria* spp. La figura muestra (a) una colonia en su placa de Petri, y (b, c, d) imágenes tomadas con un microscopio Leica DM750 (40x).

3.1. Análisis del factor pH

Para el análisis de la viabilidad de *Aspergillus sp.* y *Alternaria sp.* a diferentes pH, muestras de los dos géneros fueran inoculadas en medio agar-agar, preparado de acuerdo a las especificaciones del apartado anterior, a tres pH distintos: 7, 8 y 9. Se eligió el uso de un pH alcalino (8 y 9) considerando los datos obtenidos por las sondas *Viking* y *Phoenix*, anteriormente mencionados (Sección 2.3). Se utilizó también pH 7 a modo de control, ya que es el pH neutro y además se acerca en muchos casos al pH óptimo de crecimiento para especies de *Aspergillus* y *Alternaria* (Singh, 1980; Farooqi *et al.*, 1985; Wheeler *et al.*, 1991; Maheshwari *et al.*, 2000; Abubakar *et al.*, 2013). El medio obtenido inicialmente es ligeramente ácido (pH ~6), por lo que se utilizó Buffer Tris Básico para ajustar los medios de cultivo a los pH neutros y alcalinos deseados.

Las muestras se dejaron crecer en incubadora a 28°C (temperatura control, ver Sección 3.2). Se realizaron mediciones de crecimiento para todas las muestras de *Aspergillus* y *Alternaria* y para cada pH después de una, dos y tres semanas. Con los datos de medición, se obtuvieron los crecimientos medios (CMs) y se calcularon las diferencias de crecimientos medios (DCMs).

3.2. Análisis del factor temperatura

Para medir el efecto de la temperatura en las muestras, se realizó un análisis con un procedimiento similar al de análisis del factor pH. *Aspergillus sp.* y *Alternaria sp.* fueron inoculados en medio de cultivo agar-agar, nuevamente a los tres niveles de pH 7, 8 y 9. En este experimento, las muestras se dejaron crecer en una incubadora a 28°C por una semana para permitirle a la colonia desarrollarse y medir su crecimiento inicial; luego, fueron refrigeradas a -12°C durante la segunda semana. Esta temperatura es más alta que la temperatura media de Marte (-65°C), pero entra dentro del rango de temperatura para el ecuador de Marte, que varía aproximadamente de 30°C a -90°C (Certini *et al.*, 2009). Se obtuvieron los valores de CMs y DCMs para ambas semanas.

Finalmente, las muestras fueron colocadas una vez más en la incubadora a 28°C, en donde permanecieron una tercera semana, con el objetivo de determinar si los hongos, tras haber sido sometidos a bajas temperaturas durante la segunda semana, habían sobrevivido o no. Se obtuvieron los CMs y DCMs una vez más y se compararon con los resultados obtenidos en el análisis de factor pH, en donde todas las muestras estuvieron a 28°C las tres semanas a modo de control del experimento de temperatura.

Esta temperatura se usó también a modo de control, dado que se encuentra dentro de diversos rangos de temperaturas de crecimiento óptimo para especies de

Aspergillus y *Alternaria* reportados en múltiples experimentos (Bonner, 1948; Singh, 1980; Wheeler *et al.*, 1991; Pose *et al.*, 2009; Alborch *et al.*, 2011; Vaquera *et al.*, 2014; Kaur y Aggarwal, 2015).

3.3. Análisis del factor radiación UV-C

Después de una semana de crecimiento en medio agar-agar a pH 7 en incubadora a 28°C, las muestras de *Aspergillus sp.* y *Alternaria sp.* fueron irradiadas con una lámpara de luz UV-C (General Electric germicidal UVC lamp, flujo máximo a 254 nm, irradiación de 17.7 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) durante tres lapsos de tiempo equivalentes a 1, 2, y 5 minutos en Marte a mediodía con el flujo máximo en el ecuador. La irradiación se hizo en una cámara oscura recibiendo únicamente la luz de la lámpara. De acuerdo a Córdoba-Jabonero (2004), en condiciones de poco polvo atmosférico (profundidad óptica: $\tau_{\text{dust}} = 0.32$), con presión alrededor de 6 mbar y temperatura de 210 K, este flujo máximo en el ecuador corresponde a un valor máximo de 65 W/m^2 .

La Tabla 1 muestra los tres casos de lapsos de tiempo equivalentes a la irradiación marciana y los lapsos de tiempo reales usando la lámpara UV-C en el laboratorio. Después de una irradiación directa, las muestras se dejaron crecer en incubadora a 28°C durante otra semana y se calcularon las DCMs.

TABLA 1. TIEMPOS DE IRRADIACIÓN REALES Y EQUIVALENTES.

	<i>Marte.</i> ¹	<i>Laboratorio.</i> ²
Lapso 1	1 min	6.1 horas
Lapso 2	2 min	12.2 horas
Lapso 3	5 min	30.6 horas

¹Equivalencias de lapsos de tiempo para irradiación en Marte.

²Lapsos de tiempo reales en el laboratorio, usando una lámpara UV-C.

4. RESULTADOS

Todos los crecimientos medidos de todas las muestras, en unidades de FAPP, se muestran en la Tabla 2. Puede observarse que todos los experimentos fueron realizados por duplicado.

TABLA 2. RESULTADOS DE CRECIMIENTO PARA TODOS LOS CASOS.

<i>Caso</i> ¹				<i>Crecimiento</i> (<i>FAPP</i> ²)	<i>CM</i> ³ (<i>FAPP</i>)
<i>Aspergillus sp.</i>	Incubadora (28°C)	Semana 1	pH 7	0.0733	0.0684
				0.0635	
			pH 8	0.0223	0.0333
				0.0442	
			pH 9	0.0289	0.0267
				0.0245	
		Semana 2	pH 7	0.2426	0.2317
				0.2207	
			pH 8	0.2713	0.3036
				0.3358	
			pH 9	0.1158	0.1128
				0.1098	
Semana 3	pH 7	0.5062	0.4566		
		0.4069			
	pH 8	0.4585	0.5057		

TABLA 2. RESULTADOS DE CRECIMIENTO PARA TODOS LOS CASOS.

<i>Caso</i> ¹				<i>Crecimiento</i> (<i>FAPP</i> ²)	<i>CM</i> ³ (<i>FAPP</i>)
<i>Aspergillus sp.</i>	Incubadora (28°C)	Semana 3		0.5530	
			pH 9	0.2389	0.2313
				0.2236	
	Incubadora (28°C) + Refrigerador (-12°C) + Incubadora (28°C)	Semana 1	pH 7	0.0560	0.0534
				0.0508	
			pH 8	0.0353	0.0398
				0.0443	
			pH 9	0.0361	0.0319
				0.0277	
		Semana 2	pH 7	0.0632	0.0579
				0.0525	
			pH 8	0.0413	0.0461
				0.0509	
			pH 9	0.0482	0.0452
				0.0422	
	Semana 3	pH 7	0.0845	0.0744	
			0.0644		
		pH 8	0.0491	0.0532	
0.0572					
pH 9		0.0859	0.0724		
		0.0589			
<i>Alternaria sp.</i>	Incubadora (28°C)	Semana 1	pH 7	0.3657	0.2949
			0.2241		

TABLA 2. RESULTADOS DE CRECIMIENTO PARA TODOS LOS CASOS.

<i>Caso</i> ¹				<i>Crecimiento</i> (<i>FAPP</i> ²)	<i>CM</i> ³ (<i>FAPP</i>)
<i>Alternaria sp.</i>	Incubadora (28°C)	Semana 1	pH 8	0.2580	0.2509
				0.2437	
			pH 9	0.2107	0.2199
				0.2291	
		Semana 2	pH 7	1.0000	0.9916
				0.9832	
			pH 8	0.6718	0.6450
				0.6182	
			pH 9	0.4973	0.5584
				0.6194	
		Semana 3	pH 7	1.0000	1.0000
				1.0000	
	pH 8		1.0000	1.0000	
			1.0000		
	pH 9		1.0000	1.0000	
			1.0000		
	Incubadora (28°C) + Refrigerador (-12°C) + Incubadora (28°C)	Semana 1	pH 7	0.4028	0.4190
				0.4352	
			pH 8	0.2180	0.2283
				0.2385	
		pH 9	0.3406	0.3111	
			0.2815		
		Semana 2	pH 7	0.4435	0.4511

TABLA 2. RESULTADOS DE CRECIMIENTO PARA TODOS LOS CASOS.

<i>Caso</i> ¹				<i>Crecimiento</i> (<i>FAPP</i> ²)	<i>CM</i> ³ (<i>FAPP</i>)
<i>Alternaria sp.</i>	Incubadora (28°C) + Refrigerador (-12°C)	Semana 2	pH 8	0.4586	0.2574
				0.2227	
			0.2920		
		pH 9	0.3906	0.3495	
			0.3083		
		Refrigerador (-12°C) + Incubadora (28°C)	Semana 3	pH 7	
	0.9643				
	pH 8			0.9362	0.9485
			0.9607		
	pH 9		0.8848	0.8778	
			0.8708		
	<i>Aspergillus sp.</i>	Irradiación UV-C	Semana 1	1 min	0.0322
0.0402					
2 min				0.0418	0.0350
				0.0282	
5 min				0.0283	0.0264
				0.0244	
Semana 2			1 min	0.0901	0.0948
				0.0995	
			2 min	0.0474	0.0450
				0.0426	
			5 min	0.0342	0.0317
				0.0292	

TABLA 2. RESULTADOS DE CRECIMIENTO PARA TODOS LOS CASOS.

<i>Caso</i> ¹				<i>Crecimiento</i> (<i>FAPP</i> ²)	<i>CM</i> ³ (<i>FAPP</i>)
<i>Alternaria sp.</i>	Irradiación UV-C	Semana 1	1 min	0.5612	0.4877
				0.4142	
			2 min	0.6125	0.6004
				0.5883	
			5 min	0.5738	0.5497
				0.5255	
		Semana 2	1 min	0.7265	0.6753
				0.6242	
			2 min	0.8319	0.8163
				0.8006	
			5 min	0.7576	0.7525
				0.7474	

¹Casos clasificados por género, condición del experimento, semana de crecimiento, y pH del medio o equivalencias de lapsos de tiempo para radiación en Marte.

²Fracción de área de placa de Petri.

³Crecimiento Medio.

El efecto del pH y la temperatura son ilustrados en la Fig. 6 para *Aspergillus* y Fig. 7 para *Alternaria*. En cada figura, se presentan los dos casos descritos en la Sección 3.2. Estos casos fueron denominados *Caso1* y *Caso2*.

- *Caso1*: Tres semanas en la incubadora a 28°C.
- *Caso2*: Primera semana en la incubadora a 28°C, segunda semana en refrigeración a -12°C, y una tercera semana de nuevo en la incubadora.

Como puede observarse en la Fig. 6, *Aspergillus* creció sin problemas en medios a pH 7 y 8 (CMs totales de 46% y 51% respectivamente), pero su CM total fue menor a pH 9 (23%). Un parámetro más perjudicial para el crecimiento de las especies fue la temperatura. A -12°C, la tasa de crecimiento de *Aspergillus* decreció severamente, y alcanzó CMs totales de sólo 7.4%, 5.3% y 7.2%. En tal figura se observa claramente el contraste entre el crecimiento en *Caso1* y en *Caso2*, en donde en éste último, a partir de la semana en refrigeración, ya no presentó crecimientos tan importantes como en el primero.

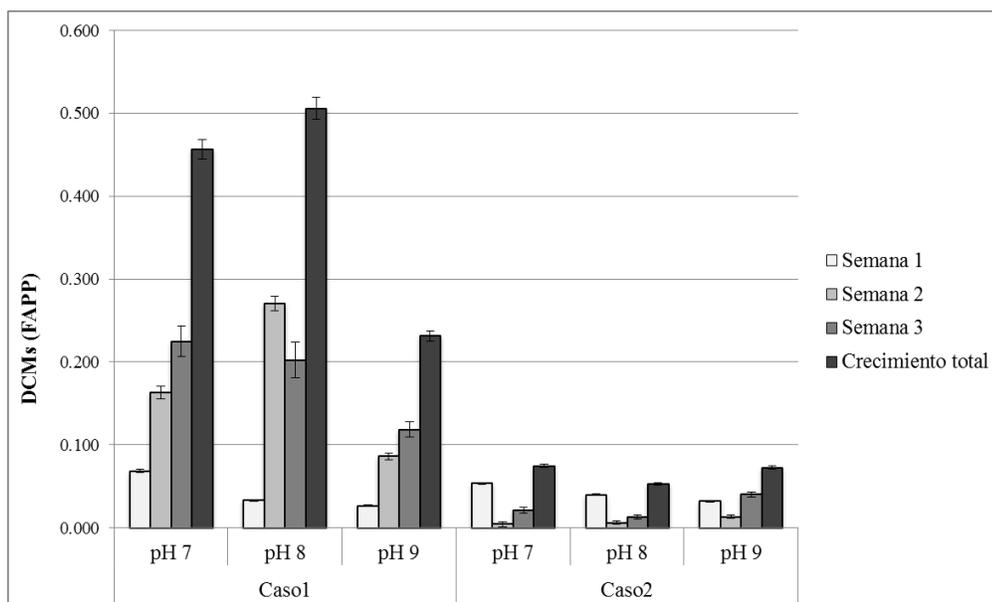


FIG. 6. Diferencias de crecimiento medio (DCMs) y crecimientos totales de *Aspergillus sp.* durante las tres semanas del experimento. El efecto del factor pH es analizado a través de la observación de los resultados de *Caso1* (28°C) a pH 7, 8 y 9. El efecto del factor temperatura es analizado por comparación entre *Caso1* y *Caso2*. Como se puede apreciar, la temperatura tuvo un efecto más perjudicial en el crecimiento que el pH alcalino en el crecimiento de *Aspergillus sp.*

Por otro lado, *Alternaria* cubrió exitosamente el 100% de la placa de Petri en sólo dos semanas a 28°C en una muestra a pH 7, y en la tercera semana alcanzó el 100% para todas las muestras en todos los pH, como se muestra en la Fig. 7. El crecimiento de *Alternaria* también disminuyó considerablemente durante la semana en refrigeración a -12°C, pero, a diferencia de *Aspergillus*, rápidamente recobró su crecimiento normal en la tercera semana, cuando fue colocado nuevamente en la

incubadora. Esto indica que la colonia sobrevivió en su totalidad, o al menos en su mayor parte, al ambiente helado. Otra característica que pudo apreciarse en el crecimiento de *Alternaria* fue el mayor desarrollo vertical de sus hifas.

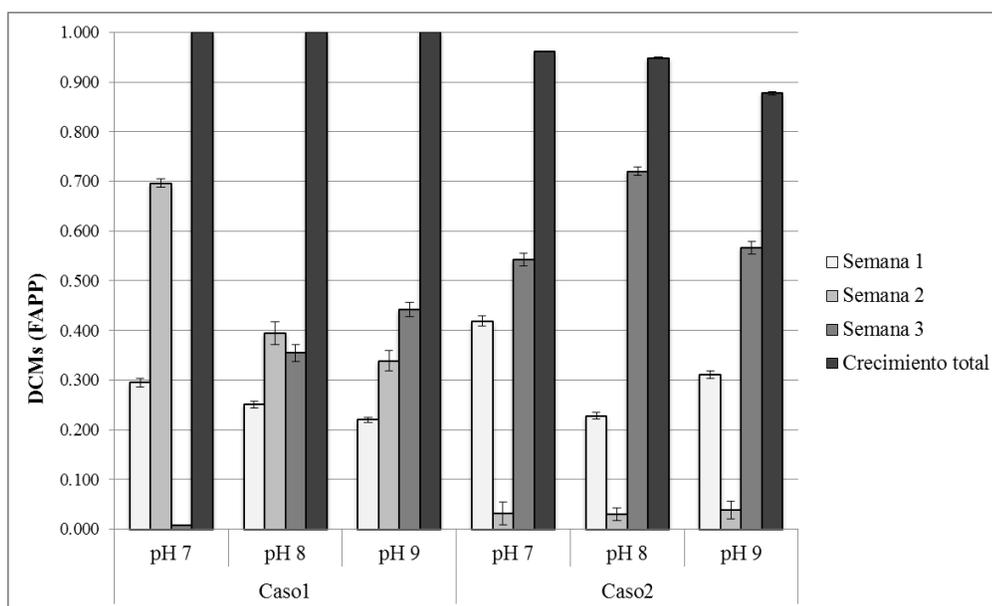


FIG. 7. Diferencias de crecimiento medio (DCMs) y crecimientos totales de *Alternaria sp.* durante las tres semanas del experimento. El efecto del factor temperatura es analizado por comparación de *Caso1* y *Caso2*. En *Caso1*, todas las muestras cubrieron totalmente el área de su placa de Petri en dos o tres semanas. Se aprecia que para la tercera semana en pH 7 se reporta un valor muy bajo de DCM, debido a que para la segunda semana las muestras ya habían cubierto casi la totalidad de la placa de Petri. Por otro lado, para *Caso2*, son notables los bajos valores de DCMs obtenidos en la segunda semana, la correspondiente al tiempo que estuvo en refrigeración a -12°C . Sin embargo, los valores de DCMs en la tercera semana de *Caso2* muestran que *Alternaria* recuperó su tasa de crecimiento normal cuando las muestras regresaron a un ambiente de 28°C .

La Fig. 8 ilustra el efecto medio de la temperatura para cada caso (*Caso1* y *Caso2*), tomando el promedio de los crecimientos totales de todas las muestras en los tres pH. Puede notarse que el factor temperatura afecta el crecimiento de ambos géneros de hongos, y que este impacto es más importante en el caso de *Aspergillus*. Para éste género, se obtuvieron unos crecimientos totales medios de 0.4 en *Caso1* y 0.07 en *Caso2* (apenas un 17% del anterior); mientras que para *Alternaria* se obtuvieron mediciones de 1 y 0.93, respectivamente.

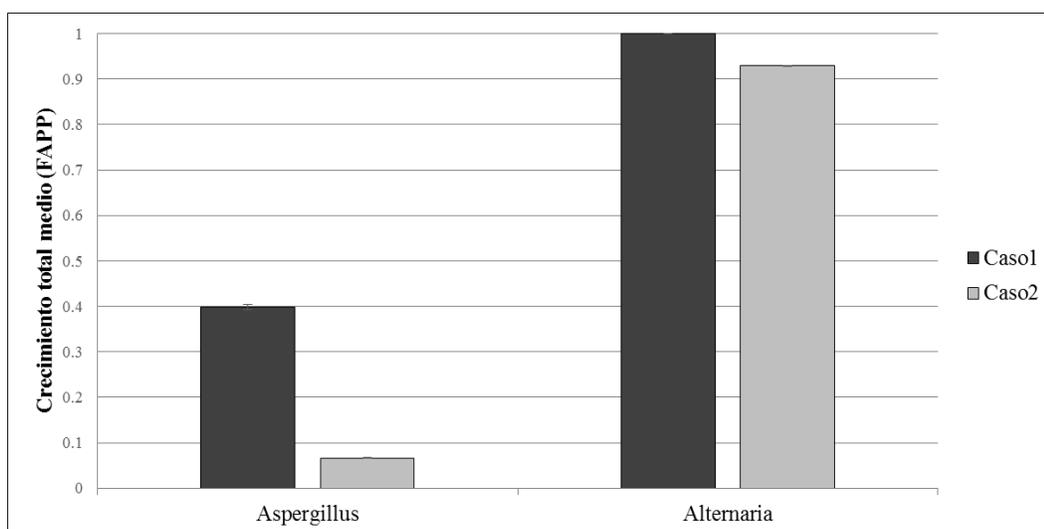


FIG. 8. Efecto medio de la temperatura para *Aspergillus sp.* y *Alternaria sp.* Los valores de crecimientos totales medios fueron obtenidos tomando el promedio del crecimiento de las muestras en los tres pH (7, 8 y 9) para cada caso (*Caso1* y *Caso2*). Como se describe en la Sección 3, *Caso1* se refiere a tres semanas a 28°C; mientras que *Caso2* se refiere a una semana a 28°C, la segunda semana a -12°C, y una tercera semana de nuevo a 28°C.

De manera similar, la Fig. 9 muestra el efecto medio del pH, tomando el promedio de los crecimientos totales en *Caso1* y *Caso2* para cada valor de pH (7, 8 y 9). Para *Aspergillus*, se obtuvo unos crecimientos totales medios de 0.27, 0.28 y 0.15, y para *Alternaria* de 0.98, .097 y 0.94, respectivamente en pH 7, 8 y 9.

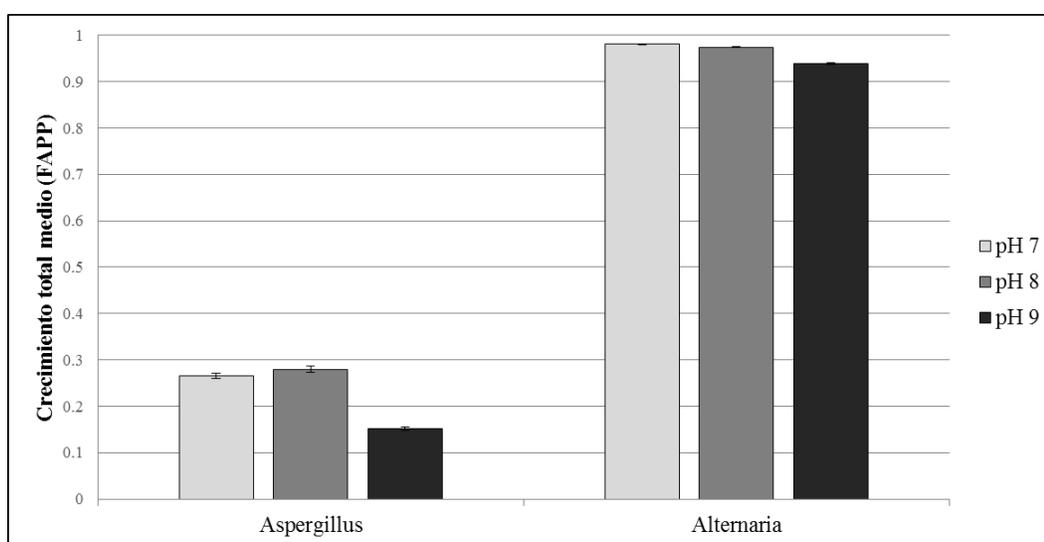


FIG. 9. Efecto medio del pH para *Aspergillus sp.* y *Alternaria sp.* Los valores de crecimientos totales medios fueron obtenidos tomando el promedio del crecimiento de las muestras en los dos casos (*Caso1* y *Caso2*) para cada valor de pH (7, 8 y 9).

Finalmente, la Fig. 10 muestra el efecto de la radiación UV-C, presentando las DCMs entre los CMs de la segunda semana (después de la irradiación) y la primera semana (antes de la irradiación). Se observa que el crecimiento de *Aspergillus* se vio mayormente mermado a mayores tiempos de exposición con un

comportamiento progresivo (DCMs: 0.059, 0.010 y 0.005). El crecimiento de *Alternaria* no se mostró afectado significativamente ni mostró ningún comportamiento específico (DCMs: 0.188, 0.216 y 0.203).

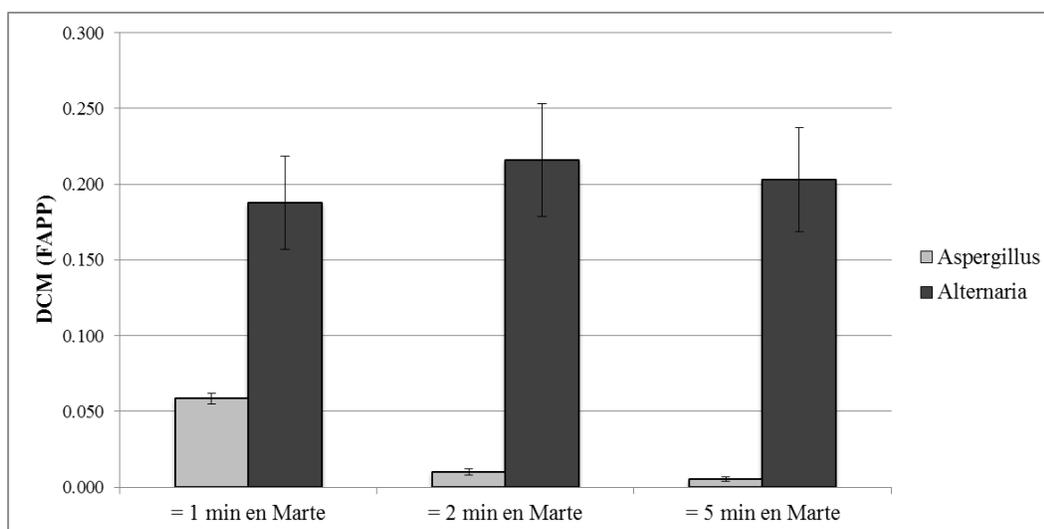


FIG. 10. Diferencias de crecimientos medios (DCMs) para *Aspergillus sp.* y *Alternaria sp.* en el análisis del factor radiación UV-C. Los valores fueron obtenidos substrayendo los crecimientos medios (CMs) medidos después de una semana de crecimiento antes de la irradiación a los CMs medidos después de una segunda semana de crecimiento después de la irradiación. El crecimiento fue en medio agar-agar a pH 7 y en incubadora a 28°C. La tasa de crecimiento de *Aspergillus* disminuyó a tiempos de exposición más largos, mientras que *Alternaria* no se vio afectado significativamente.

5. DISCUSIÓN

5.1. pH

En el caso del análisis de pH, los resultados que se observan en el *Caso1* (descrito en Sección 3) de la Fig. 6, indican que *Aspergillus* puede crecer adecuadamente tanto en ambientes con pH 7 como con pH 8, pero dadas las dificultades que tuvo para crecer a pH 9, parece poco probable que pueda crecer en ambientes más alcalinos. Wheeler *et al.* (1991) y Abubakar *et al.* (2009) habían ya reportado en sus experimentos que el crecimiento de algunas especies de *Aspergillus* decaía hacia valores de pH más alcalinos que 7. Por otro lado, los resultados mostrados en la Fig. 7 (también *Caso1*) indican que *Alternaria* puede reproducirse sin importar si se encuentra en un ambiente de pH 7, 8 o 9; sin embargo, sí mostró una preferencia por el pH 7, dada la tasa de crecimiento apreciada en tales muestras, cubriendo en una de ellas la totalidad de la placa de Petri en sólo dos semanas.

Como puede observarse al comparar el *Caso2* con el *Caso1* en ambas figuras (Figs. 6 y 7), y más claramente al comparar entre la Fig. 8 y la Fig. 9, el efecto de la temperatura es mucho más significativo que el del pH, por lo que sería impreciso determinar el efecto del pH en *Caso2*.

Dado que es probable que la mayor parte del suelo marciano tenga un pH similar al medido en las misiones *Viking* y *Phoenix* (alrededor de 8 y 7.7 ± 5 ; según Schuerger *et al.*, 2012), podemos suponer que la alcalinidad del suelo marciano no representa un problema de viabilidad para estas especies.

5.2. Temperatura

En el análisis del efecto de la temperatura (*Caso2* en Figs. 6 y 7), se observa que a bajas temperaturas (-12°C) la tasa de crecimiento de ambos géneros de hongos se vio paralizada o ralentizada. Sin embargo, al dejarlos crecer una semana más en condiciones más favorables (28°C), *Alternaria* recuperó su tasa de crecimiento normal, como si nunca hubiera sido expuesta a bajas temperaturas, mientras que el crecimiento de *Aspergillus* se detuvo. Observaciones posteriores indican que la colonia de *Aspergillus* no murió completamente. Algunas células sobrevivieron a la baja temperatura y, como *Alternaria*, pasó a un estado de “baja tasa de crecimiento”. Después, las células sobrevivientes comenzaron a reproducirse nuevamente para mantener a la colonia. Sin embargo, probablemente una exposición de mayor tiempo a -12°C mataría eventualmente a todas las células, por lo que estos resultados indican que *Aspergillus* no es un buen candidato para sobrevivir a bajas temperaturas.

En el caso de *Alternaria*, se considera que es un organismo más adecuado que *Aspergillus* para sobrevivir al ambiente helado de Marte, como se puede observar en la Fig. 8, considerando que la colonia pudo sobrevivir a la temperatura de -12°C , continuar creciendo en esas condiciones (aunque a tasas bajas), y luego rápidamente recuperar su tasa normal de crecimiento a temperaturas más cálidas (Fig. 7, *Caso2*). Estudios previos ya habían demostrado que para algunas especies

de los géneros *Aspergillus* y *Alternaria* su temperatura óptima de crecimiento rondaba los 30°C (Bonner, 1948; Pose *et al.*, 2009; Alborch *et al.*, 2011; Vaquera *et al.*, 2014), sin embargo, en los experimentos realizados por Pose *et al.* (2009) y Vaquera *et al.* (2014) ya se observaba que *Alternaria* era capaz de crecer, aunque a tasas menores, a 6°C (la temperatura más baja utilizada por ellos) si la actividad de agua es suficientemente alta ($\geq 0.92 a_w$)

Como se mencionó en la sección anterior (5.1), la temperatura tuvo un efecto más importante que el pH, como se observa al comparar las Figs. 8 y 9. Para ratificar esta afirmación, en la Tabla 3 se realizó un cálculo de desviaciones estándar para los valores en la Fig. 8 (temperatura) y en la Fig. 9 (pH). La desviación estándar del efecto de la temperatura superó a la del efecto del pH en el caso de *Aspergillus* y también en el de *Alternaria*.

Futuros experimentos similares podrían considerar someter especies a -65°C . Empero, la temperatura de -12°C utilizada en este experimento se encuentra dentro del rango típico de la temperatura en la superficie marciana en el ecuador (30°C a -90°C) (Certini *et al.*, 2009), y regiones especiales para la supervivencia de organismos en Marte mencionadas por Schuerger *et al.* (2013) pueden incluir zonas relativamente cálidas, como cercanas al ecuador, con actividad volcánica o ambientes húmedos que regulen la temperatura y eviten que ésta baje drásticamente (los ambientes húmedos pueden actuar como reguladores de temperatura al tener el agua una capacidad calorífica mayor que el suelo seco).

Los resultados del presente experimento, por tanto, sugieren que organismos extremófilos pueden sobrevivir, al menos de manera latente o en un estado de metabolismo lento, en ambientes marcianos relativamente cálidos para el planeta y/o con temperaturas reguladas.

TABLA 3. COMPARACIÓN ENTRE EFECTOS DE TEMPERATURA Y PH

Género.			Valores. ¹	Desv. Est. ²
<i>Aspergillus</i>	Temperatura	<i>Caso1</i>	0.4	0.23
		<i>Caso2</i>	0.07	
	pH	7	0.27	0.07
		8	0.28	
		9	0.15	
	<i>Alternaria</i>	Temperatura	<i>Caso1</i>	1
<i>Caso2</i>			0.93	
pH		7	0.98	0.02
		8	0.97	
		9	0.93	

¹Estos valores son los promedios de los crecimientos totales ilustrados en las Figs. 8 y 9.

²Desviación estándar.

5.3. Radiación UV-C

Comparando las DCMs calculadas en los análisis de los factores pH y temperatura con las calculadas en el análisis del factor radiación UV-C (Fig. 10), puede observarse que el crecimiento a corto plazo de *Alternaria* no fue afectado tan severamente por la irradiación como *Aspergillus*, el cual resultó dañado ante el factor estudiado, y se observa en la Fig. 10 cómo su crecimiento disminuyó a mayores tiempos de irradiación con un comportamiento progresivo. En un estudio realizado por García-Cela *et al.* (2015) se había observado que especies del género *Aspergillus* eran afectadas significativamente por radiación UV-B, pero en órdenes de varios días. El grado en que ambos géneros fueron afectados por la radiación también puede observarse (y quizá con mayor claridad) al comparar los CMs totales a la segunda semana de los experimentos de radiación UV-C con el CM total (también a la segunda semana) de las muestras controles a pH 7 y 28°C en *Casol* para ambos géneros. Estos valores se encuentran en la Tabla 2, pero son ilustrados en la Fig. 11 a continuación. Los CMs de *Aspergillus* fueron menores en los experimentos de radiación que en el control de *Casol* por factores de entre 2.4 y 7.3, mientras que en el caso de *Alternaria* fueron menores por factores de entre 1.2 a 1.4.

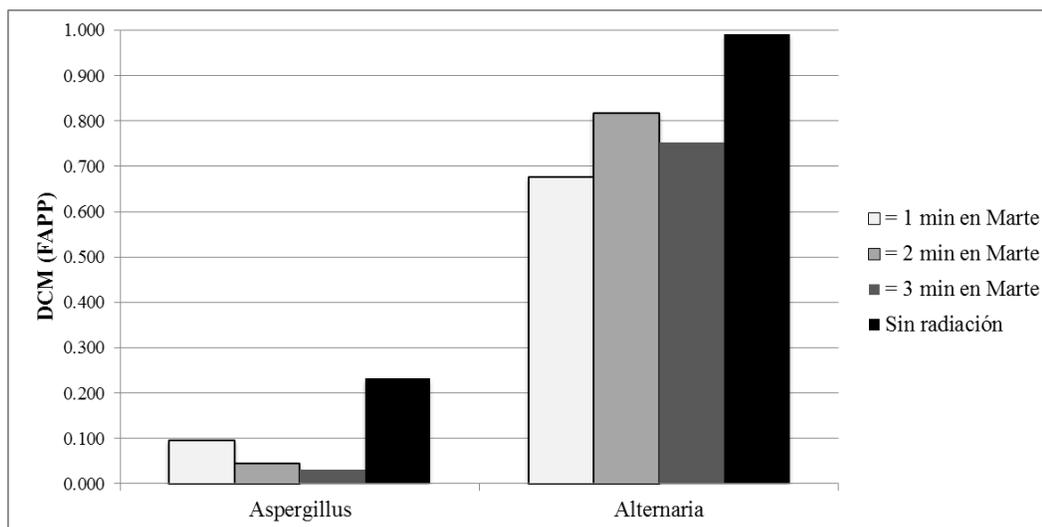


FIG. 11. Comparación entre los CMs totales en después de la segunda semana de crecimiento en el experimento de radiación UV-C (equivalente a 1, 2 y 5 min en Marte, a pH 7 y 28°C) y el CM total después de la segunda semana de crecimiento a pH 7 y 28°C de *Casol* sin radiación; para *Aspergillus* y *Alternaria*. Los valores aquí graficados pueden encontrarse también en la Tabla 2. Se observa que ambos géneros fueron afectados por la radiación, pero *Aspergillus* en mucho mayor grado.

La resistencia que *Alternaria* muestra ante la radiación ultravioleta (y también a bajas temperaturas) puede deberse a un mayor desarrollo vertical de capas de hifas y a su mayor y rápido crecimiento inicial (características que no fueron tan predominantes en *Aspergillus*), como un mecanismo de defensa que le permitió a la colonia protegerse a sí misma. Mecanismos de supervivencia similares son mencionados por Selbmann *et al.* (2011) y por Gorbushina (2003). Además, se sabe que las paredes celulares de especies del género *Alternaria* son más gruesas y

poseen altos niveles de melanina (Pridham y Woohead, 1977; Kimura y Tsuge, 1993; Kawamura *et al.*, 1997; Anitha y Murugesan, 2008; Sterflinger *et al.*, 2012). La melanina es una macromolécula biológica responsable de la pigmentación oscura de algunos organismos, como los hongos, y es conocida por sus propiedades protectoras contra la radiación ultravioleta y ionizante (Onofri *et al.*, 2008, 2014).

Estudios posteriores deberían incrementar el flujo de radiación UV para ser más precisos en estas conclusiones. Sin embargo, autores como Mancinelli (1998), Cockell y Raven (2004), y Schuerger *et al.* (2013), consideran que los organismos en Marte podrían sobrevivir a la radiación UV que llega a la superficie del planeta creciendo en ecosistemas subterráneos, aun si éstos se encuentran sólo bajo unos cuantos milímetros de polvo. Además, Taubner *et al.* (2015) considera que, tomando en cuenta que organismos en la Tierra primitiva eran resistentes a altos niveles de radiación, hipotéticos organismos marcianos podrían estar adecuados para resistir la radiación UV que llega a Marte.

5.4. Otras consideraciones sobre habitabilidad

A pesar de la evidencia de agua líquida encontrada en Marte, autores como Martín-Torres *et al.* (2015) aún consideran que la actividad de agua y la temperatura son demasiado bajas para mantener organismos terrestres. No obstante, hacen falta más estudios con extremófilos y más datos sobre la superficie de Marte que probablemente podrían cambiar esta perspectiva. Sobre el efecto que tendría la sequedad al interactuar con la radiación UV en la superficie marciana, no se consideró en los experimentos de la presente tesis, ni se encontraron datos bibliográficos para el caso de los hongos, por lo que se desconoce si la interacción sería aditiva, sinérgica o antagónica. El efecto antagónico, cuando la desecación provee a un organismo cierta resistencia para la radiación UV o viceversa, se ha observado en plantas (Balakumar *et al.*, 1993; Kubiś y Rybus-Zajac, 2008; Bandurska *et al.*, 2013) y otros organismos multicelulares como los tardígrados o larvas de quironómidos, y en células de la bacteria *Deinococcus radiodurans* (Bauermeister *et al.*, 2011). Un efecto antagónico sería el caso más favorable para organismos que habitaran Marte. De cualquier manera, hipotéticos organismos nativos de Marte, de estar más adecuados para el ambiente marciano que los extremófilos de la Tierra, podrían habitar el planeta con estas condiciones de bajas temperaturas, radiación ultravioleta y sequedad. Una posibilidad es que tales organismos posean gruesas paredes celulares pigmentadas para protegerse. Paredes

celulares gruesas y pigmentos como la melanina no sólo sirven como protección ante la radiación UV, sino también para diversas condiciones del entorno como temperaturas extremas y sequedad (Kubiś y Rybus-Zajac, 2008; Bauermeister *et al.*, 2011; Sterflinger *et al.*, 2012; Onofri *et al.*, 2012; 2014).

Marte posee una atmósfera anóxica, considerada por algunos autores como agente biocida (Schuerger *et al.*, 2013); sin embargo, organismos terrestres primitivos vivían en condiciones anóxicas en la Tierra primitiva y los actuales han requerido de la evolución y la selección natural para sobrevivir a la atmósfera altamente oxidante que actualmente existe en la Tierra (Scharf, 2009). Al menos desde tal perspectiva, parece incluso que, para que un planeta pueda albergar vida, es preferible una atmósfera anóxica. De hecho, Domagal-Goldman *et al.* (2011) sugieren que los planetas con vida pero sin oxígeno molecular (*i.e.*, O₂, O₃) en su atmósfera podrían representar una fracción grande de los planetas habitados.

En relación a la detección de metano en Marte, Webster *et al.* (2015) proponen que los eventos episódicos de liberación del gas se deben a más de un mecanismo. Sin embargo, múltiples mecanismos aislados probablemente generarían metano de una manera más aleatoria y menos episódica. Otra explicación es que estos episodios de liberación de metano sean originados de manera biológica por procesos metabólicos cíclicos aun no comprendidos. Además, Webster *et al.* (2015) concluye que estos eventos deben ser de índole local, y

Kasting (2010) propuso que la detección de metano tendría más peso como auténtica bioseñal, en el caso de que fuera detectado con variaciones a escala local.

Los organismos metanógenos son una de las formas de vida más antiguas en la Tierra. Se han descubierto fósiles que indican su presencia hace 2.7 Ga, e incluso se han descubierto rastros de metano biológico en muestras de hace 3.7 Ga (Taubner *et al.*, 2015). Esto corresponde a los años finales del periodo Noachiano de Marte, la época en la que se cree que el agua fue más abundante, y también a los años finales del Bombardeo Intenso Tardío, en el que los cuerpos del Sistema Solar interior sufrieron los impactos de múltiples cuerpos (asteroides, cometas, meteoros). En esta época, pudo haberse generado un gran intercambio de material orgánico entre Marte y la Tierra, e incluso varios eventos de panspermia como un Sistema Multihabitable. Steffen y Li (2016) sugieren que planetas en una misma Zona Habitable pueden tener regiones de climas similares, lo que permitiría a grupos de organismos extenderse por el sistema. Esto es consistente con la hipótesis de que en el pasado, Marte y la Tierra fueron muy similares. De ser todas estas hipótesis correctas, es posible que organismos metanógenos existieran en ambos planetas. Además, el metabolismo energético de organismos metanógenos no requiere de oxígeno, por lo que podrían existir en un ambiente anóxico como Marte.

Es también notable la aparente importancia que tiene el cloro en los sistemas marcianos relacionados con la posible vida en ese planeta. El agua líquida hasta ahora descubierta en Marte se halla en forma de salmueras de cloratos y percloratos.

De manera similar, las moléculas orgánicas detectadas se encuentran como compuestos clorados. El cloro podría jugar un papel más importante en la vida de Marte, si es que la hay o hubo, que lo que juega en la vida en la Tierra.

6. CONCLUSIONES

1. El pH, la temperatura, y la radiación ultravioleta son factores importantes en la supervivencia de organismos. Sin embargo, los efectos varían de una especie a otra. Al menos para los organismos analizados en este estudio, bajas temperaturas y la radiación UV-C directa fueron agentes más dañinos que un medio alcalino de hasta pH 9.

2. En todos los experimentos, *Alternaria sp.* tuvo una tasa de crecimiento mayor que *Aspergillus sp.*, indicando que es un candidato más adecuado para sobrevivir a condiciones severas como las que se encuentran presentes en Marte. La flexibilidad que presentan *Alternaria* y otros géneros de hongos (ver Sección 2.6) para adaptarse los hacen un buen ejemplo de organismos que podrían ser transportados y sobrevivir en ambientes extremos como Marte. Aún se requiere de más investigación para determinar la probabilidad de supervivencia de estos organismos durante el viaje a Marte y en el suelo marciano (ya sea en la superficie, o debajo de ella, incluso en permafrost), pero estudios como el presente demuestran que, bajo ciertas condiciones, parece posible. El género *Alternaria* definitivamente debe ser considerado para futuros estudios con otros parámetros (sequedad, salinidad, composición y presión atmosférica, etc.), o bien, con periodos más largos a temperaturas más bajas, y a mayores tiempos de irradiación. Se recomienda altamente que se consideren experimentos donde se

interrelacionen los efectos de la radiación UV con la sequedad, con el fin de determinar si el comportamiento de esta interrelación es aditiva, sinérgica o antagónica. El peor de los casos sería una interrelación sinérgica, pues los efectos perjudiciales hacia los organismos de la radiación UV y de la sequedad se verían aumentados. El mejor de los casos sería el antagónico, en donde se verían disminuidos.

3. En el caso de declararse Marte como un planeta habitable, implicaría que un evento de panspermia inversa podría convertir a extremófilos como los hongos en los principales colonizadores o invasores en la superficie marciana. Misiones espaciales futuras también deben considerar la resistencia de estos organismos a condiciones adversas para evitar contaminaciones biológicas accidentales, o, por otro lado, para seleccionar a las especies adecuadas si se desea sembrarlas de forma deliberada.

4. Características genotípicas y fenotípicas de hongos y otros extremófilos, responsables de su resistencia a diversas condiciones, podrían ser útiles en futuros experimentos de ingeniería genética con otras especies, con el objetivo de colonizar o terraformar a Marte. En el caso de los hongos, una de sus características más importantes parece ser su pared celular, sobre todo si ésta es gruesa y pigmentada.

5. A pesar de las limitaciones del estudio, todo parece indicar que los problemas de viabilidad, concernientes al pH del suelo marciano, las bajas

temperaturas y la intensa radiación ultravioleta presentes en la superficie de Marte, tienen soluciones factibles: las severas condiciones de Marte, letales para el ser humano y otros organismos complejos, pueden llegar a ser soportadas por extremófilos si éstos cuentan con mecanismos biológicos de defensa y, principalmente, con la protección de una región especial en el planeta que sea propicia para la vida como la conocemos. En el caso de *Alternaria*, sus gruesas paredes celulares, la producción de melanina, y su rápido crecimiento colonial, sirven como mecanismos biológicos de defensa, mientras que el polvo en la superficie de Marte jugaría un papel protector contra los efectos adversos de la radiación UV.

6. Los microhábitats húmedos subterráneos en Marte podrían ser la clave para la supervivencia de organismos (terrestres o nativos marcianos). La radiación UV es uno de los parámetros más dañinos para los seres vivos, y puede ser evitada de esta manera. El pH del suelo marciano podría ser relativamente homogéneo en el planeta, y no representaría mayor problema a especies que presenten una resistencia similar o incluso mayor a la de los hongos analizados en el presente estudio. Finalmente, la presencia de agua líquida (en forma de salmueras) en estos microhábitats podría servir de soporte principal de la vida, sirviendo también como regulador térmico y permitiendo reacciones bioquímicas indispensables para los organismos (si estos son capaces de resistir los niveles de salinidad o si cuentan con mecanismos biológicos de desalinización). Es crucial,

entonces, localizar estos microhábitats en Marte con la finalidad de detectar rastros de vida; y, en caso de no encontrarse, de realizar experimentos *in situ* que permitan de manera definitiva clasificar o no a Marte como un planeta habitable.

7. Los resultados obtenidos en este estudio, si bien no son definitivos, sugieren que los organismos extremófilos son potencialmente capaces de resistir diversas condiciones, entre ellas las que existen en Marte. En caso de determinar que organismos terrestres puedan sobrevivir plenamente a todas sus condiciones, Marte podría ser considerado habitable.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Abubakar, A., Suberu, H.A., Bello, I.M., Abdulkadir, R., Daudu, O.A. y Lateef A.A. (2013) Effect of pH on mycelial growth and sporulation of *Aspergillus parasiticus*. *J Plant Sci* 1:64-67

Alborch, L., Bragulat, M.R., Abarca, M.L. y Cabañes, F.J. (2011) Effect of water activity, temperature and incubation time on growth and ochratoxin A production by *Aspergillus niger* and *Aspergillus carbonarius* on maize kernels. *Int J Food Microbiol* 147:53-57.

Anitha, R. y Murugesan, K. (2008) Melanin production in *Alternaria helianthi*. *Arch Phytopathol Plant Protect* 41:360-364.

Bak, E.N., Jensen, S.J.K., Nørnberg, P. y Finster, K. (2016) Methylated silicates may explain the release of chlorinated methane from Martian soil. *Earth Planet Sci Lett* 433:226-231.

Balakumar, T., Hani Babu Vincent, V. y Kailash Paliwal (1993) On the interaction of UV-B radiation (280-315 nm) with water stress in crop plants. *Physiol Plant* 87:217-222.

Bandurska, H., Niedziela, J. y Chadzinikolau, T. (2013) Separate and combined responses to water deficit and UV-B radiation. *Plant Sci* 213:98-105.

Batjes, N.H. (1995) A global data set of soil pH properties. Technical paper 27, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen.

Bauermeister, A., Moeller, R., Reitz, G., Sommer, S. y Rettberg P. (2011) Effect of relative humidity on *Deinococcus radiodurans*' resistance to prolonged desiccation, heat, ionizing, germicidal, and environmentally relevant UV radiation. *Microb Ecol* 61:715–722.

Bauermeister, A., Rettberg, P., y Flemming, H. (2014) Growth of the acidophilic iron–sulfur bacterium *Acidithiobacillus ferrooxidans* under Mars-like geochemical conditions. *Planet Space Sci* 98:205-215.

Berry, B.J., Jenkins, D.G., y Schuerger, A.C. (2010) Effects of simulated Mars conditions on the survival and growth of *Escherichia coli* and *Serratia liquefaciens*. *Appl Environ Microbiol* 76:2377-2386.

Bonner, J.T. (1948) A study of the temperature and humidity requirements of *Aspergillus niger*. *Mycologia* 40:728-748.

Cantor, A.B. (2007) MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm. *Icarus* 186:60-96.

Certini, G., Scalenghe, R., y Amundson, R. (2009) A view of extraterrestrial soils. *Eur J Soil Sci* 60:1078-1092.

Cockell, C.S. (2014) Habitable worlds with no signs of life. *Phil Trans R Soc A* 372:1-15.

Cockell, C.S. y Raven, J.A. (2004) Zones of photosynthetic potential on Mars and the early Earth. *Icarus* 169:300-310.

Córdoba-Jabonero, C. (2004) Radiación ultravioleta solar en Marte: Implicaciones biológicas y búsqueda de ambientes potencialmente habitables. Disponible en línea: <http://www.semae.es/wp-content/uploads/2011/04/MArte-y-UV-Rad.pdf>

Córdoba-Jabonero, C., Lara, L.M., Mancho, A.M., Márquez, A., y Rodrigo R. (2003) Solar ultraviolet transfer in the Martian atmosphere: biological and geological implications. *Planet Space Sci* 51:399-410.

Cull, S. (2007) Reverse panspermia: seeding life in the solar system. *Sky Telescope* 113:34-39.

Domagal-Goldman, S.D., Meadows, V.S., Claire, M.W. y Kasting, J.F. (2011) Using biogenic sulfur gases as remotely detectable biosignatures on anoxic planets. *Astrobiology* 11:419-441.

Dvorak, R., Maindl, T.I., Burger, C., Schäfer, C. y Speith, R. (2015) Planetary systems and the formation of habitable planets. Disponible en línea en: <http://arxiv.org/pdf/1502.02937v1.pdf>

Farooqi, W.A., Malik, M.A., Shaukat, G.A. y Ahmad, M.S. (1985) Influence of pH on the growth of *Alternaria citri* on citrus fruit juice. *Proc Fla State Hort Soc* 98:214-215.

Ferrari, F. y Szuszkiewicz, E. (2009) Cosmic rays: a review for astrobiologists. *Astrobiology* 9:413-436.

Fonti, S., Mancarella, F., Liuzzi, G., Roush, T.L., Chizek Frouard, M., Murphy, J. y Blanco, A. (2015) Revisiting the identification of methane on Mars using TES data. *Astron Astrophys* A136:1-11.

Formisano, V., Atreya, S., Encrenaz, T., Ignatiev, N., y Giuranna, M. (2004) Detection of methane in the atmosphere of Mars. *Science* 306:1758-1761.

Freissinet, C., Glavin, D.P., Mahaffy, P.R., Miller, K.E., Eigenbrode, J.L., Summons, R.E., Brunner, A.E., *et al.* (2015) Organic molecules in the Sheepbed Mudstone, Gale Crater, Mars. *J Geophys Res Planets* 120:495-514,

García-Cela, M.E., Marín, S., Reyes, M., Sanchis, V. y Ramos, A.J. (2015) Conidia survival of *Aspergillus* section *Nigri*, *Flavi* and *Circumdati* under UV-A and UV-B radiation with cycling temperature/light regime. *J Sci Food Agric* (2015):1-8.

Gómez, F., Mateo-Martí, E., Prieto-Ballesteros, O., Martín-Gago, J., y Amils, R. (2010) Protection of chemolithoautotrophic bacteria exposed to simulated Mars environmental conditions. *Icarus* 209:482-487.

Gorbushina, A. (2003) Methodologies and techniques for detecting extraterrestrial (microbial) life. Microcolonial fungi: survival potential of terrestrial vegetative structures. *Astrobiology* 3:543-554.

Gunde-Cimerman, N., Sonjak, S., Zalar, P., Frisvad, J.C., Diderichsen, B., y Plemenitas, A. (2003) Extremophilic fungi in arctic ice: a relationship between adaptation to low temperature and water activity. *Phys Chem Earth* 28:1273-1278.

Guzmán-Marmolejo, A. y Segura, A. (2015) Methane in the Solar System. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 67:377-385.

Horneck, G. (2008) The microbial case for Mars and its implication for human expeditions to Mars. *Acta astronaut* 63:1015-1024.

Ivanov, B.A. y Hartmann, W.K. (2007) Exogenic dynamics, cratering and surface ages. *Treatise on Geophysics* 10:207-242.

Jakosky, B.M., Grebowsky, J.M., Luhmann, J.G., Connerney, J., Eparvier, F., Ergun, R., Halekas, J., *et al.* (2015) MAVEN observations of the response of Mars to an interplanetary coronal mass ejection. *Science* 350:aad0210-1- aad0210-7.

Jansen, M.A.K., Gaba, V. y Greenberg B.M. (1998) Higher plants and UV-B radiation: balancing damage, repair and acclimation. *Trends Plant Sci* 3:131-135.

Kane, S.R. (2014) Habitable Zone dependence on stellar parameter uncertainties. *Astrophys J* 782:1-8.

Kasting, J.F. (2010) How to find a habitable planet. *Princeton University Press*.

Kaur, M. y Aggarwal, N.K. (2015) Effect of different temperature on growth of *Alternaria macrospora* isolated from parthenium weed. *Plant Sci Feed* 5:50-54.

Kawamura, C., Moriwaki, J., Kimura, N., Fujita, Y., Fuji, S., Hirano, T., *et al.* (1997) The melanin biosynthesis genes of *Alternaria alternata* can restore pathogenicity of the melanin-deficient mutants of *Magnaporthe grisea*. *Phytopathology* 10:446-453.

Kimura, N. y Tsuge, T. (1993) Gene cluster involved in melanin biosynthesis of the filamentous fungus *Altemaria altemata*. *J Bacteriol* 175:4427-4435.

Kochkina, G., Ivanushkina, N., Ozerskaya, S., Chigineva, N., Vasilenko, O., Firsov, S., *et al.* (2012) Ancient fungi in Antarctic permafrost environments. *FEMS Microbiol Ecol* 82:501-509.

Kubiś, J. y Rybus-Zajac M. (2008) Drought and excess UV-B irradiation differentially alter the antioxidant system in cucumber leaves. *Acta Biol Crac Ser Bot* 50:35-41.

Lammer, H., Kulikov, Yu.N., Penz, T., Leitner, M., Biernat, H.K. y Erkaev, N.V. (2005) Stellar-planetary relations: atmospheric stability as a prerequisite for planetary habitability. In *A comparison of the dynamical evolution of planetary systems*. Editado por Dvorak, R. y Ferraz-Mello, S. *Springer*.

Maheshwari, S. K., Singh, D. V. y Singh, S. B. (2000) Effect of temperature and pH on growth and sporulation of *Alternaria alternata* causing *Alternaria* leaf spot of dolichos bean. *Ann Plant Protect Sci* 8:33-35.

Mancinelli, R.L. (1998) Prospects for the evolution of life on Mars: Viking 20 years later. *Adv Space Res* 22:471-477.

Martín-Torres, F.J., Zorzano, M.P., Valentín-Serrano, P., Harri, A.M., Genzer, M., Kemppinen, O., Rivera-Valentin, E.G., *et al.* (2015) Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars. *Nat Geosci* 8:357-361.

Martínez Blanco, X., Tejera, L., y Beri, A. (2015) First volumetric record of fungal spores in the atmosphere of Montevideo City, Uruguay: a 2-year survey. *Aerobiologia* Published online. DOI 10.1007/s10453-015-9403-5.

Mckay, C.P. y Davis, W.L. (1991) Duration of liquid water habitats on early Mars. *Icarus* 90:214-221.

Melosh, H.J. (1988) The rocky road to panspermia. *Nature* 332:687-688.

Mileikowsky, C., Cucinotta, F.A., Wilson, J.W., Gladman B., Horneck, G., Lindegren, L., Melosh, *et al.* (2000) Natural transfer of viable microbes in space. 1. From Mars to Earth and Earth to Mars. *Icarus* 145:391-427.

Mitrofanov, I., Anfimov, D., Kozyrev, A., Litvak, M., Sanin, A., Tret'yakov, V., Krylov, V., *et al.* (2002) Maps of subsurface hydrogen from the high energy neutron detector, Mars odyssey. *Science* 297:78-81.

Moeller, R., Schuerger, A.C., Reitz, G., y Nicholson, W.L. (2012) Protective role of spore structural components in determining *Bacillus subtilis* spore resistance to simulated Mars surface conditions. *Appl Environ Microbiol* 78:8859-8853.

Mumma, M.J., Villanueva, G.L., Novak, R.E., Hewagama, T., Bonev, B.P, DiSanti, *et al.* (2009) Strong release of methane on Mars in northern summer 2003. *Nasa Public Affairs* 1165243.

National Aeronautics and Space Administration. (2015) NASA mission reveals speed of solar wind stripping Martian atmosphere. Disponible en línea: <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-mission-reveals-speed-of-solar-wind-stripping-martian-atmosphere>

National Aeronautics and Space Administration. (s.f.) Mars facts. Disponible en línea: <http://mars.nasa.gov/allaboutmars/facts/#?c=inspace&s=distance>

Navarro-González, R., Rainey, F.A., Molina, P., Bagaley, D.R., Hollen, B.J., de la Rosa, J., Small, A.M. *et al.* (2003) Mars-like soils in the Atacama Desert, Chile, and the dry limit of microbial life. *Science* 302:1018-1021.

Navarro-González, R., Navarro, K.F., de la Rosa, J., Iñiguez, E., Molina, P, Miranda, L.D., Morales, P., *et al.* (2006) The limitations on organic detection in Mars-like soils by thermal volatilization–gas chromatography–MS and their implications for the Viking results. *PNAS* 103:16089-16094.

Navarro-González, R., Vargas, E., de la Rosa, J., Raga, A.C., McKay, C.P. (2010) Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars. *J Geophys Res* 115:1-11.

Núñez, P.G., García-Suárez, P.C., Vázquez, R., González, A., Reyes-Ruiz, M., Aceves, *et al.* (2015) Pollen viability on Martian soils I: The pH effect and a previous study on the effect of UV radiation. In preparation.

O’Gorman, C.M. (2011) Airborne *Aspergillus fumigatus* conidia: a risk factor for aspergillosis. *Fungal Biol Rev* 25:151-157.

Oishi, M. y Kamaya, H. (2016) A simple evolutionary model of Habitable Zone around host stars with various mass and low metallicity. *Astrophys Space Sci* 361:1-6.

Ojha, L., Wilhelm, M.B., Murchie, S.L., McEwen, A.S., Wray, J.J., Hanley, J., *et al.* (2015) Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars. *Nat Geosci* 8:829-833.

Ollivier, M., Encrenaz, T., Roques, F., Selsis, F., Casoli, F. (2009) Planetary Systems. *Astronomy and Astrophysics Library. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.*

Olsson-Francis, K. y Cockell, C.S. (2010) Experimental methods for studying microbial survival in extraterrestrial environments. *J Microbiol Methods* 80:1-13.

Onofri, S., Barreca, D., Selbmann, L., Isola, D., Rabbow, E., Horneck, G., de Vera, *et al.* (2008) Resistance of Antarctic black fungi and cryptoendolithic communities to simulated space and Martian conditions. *Stud Mycol* 61:99-109.

Onofri, S., Selbmann, L., Barreca, D., Isola, D., y Zucconi, L. (2009) Do fungi survive under actual space conditions? Searching for evidence in favour of lithopanspermia. *Plant Biosyst* 143:85-87.

Onofri, S., de la Torre, R., de Vera, J.P.P., Ott, S., Zucconi, L., Selbmann, L., Scalzi, G., *et al.* (2012) Survival of rock-colonizing organisms after 1.5 years in outer space. *Astrobiology* 12:508-516.

Onofri, S., Zucconi, L., Isola, D., y Selbmann, L. (2014) Rock-inhabiting fungi and their role in deterioration of stone monuments in the Mediterranean area. *Plant Biosyst* 148:384-391.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.) Otros Mapas y Bases de Datos Globales del Suelo. Disponible en línea: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/otros-mapas-y-bases-de-datos-globales-del-suelo/es/>

Patel, M.R., Zarneckia, J.C., y Catling, D.C. (2002) Ultraviolet radiation on the surface of Mars and the Beagle 2 UV sensor. *Planet Space Sci* 50:915-927.

Pose, G., Patriarca, A., Kyanko, V., Pardo, A. y Fernández Pinto, V. (2009) Effect of water activity and temperature on growth of *Alternaria alternata* on a synthetic tomato medium. *Int J Food Microbiol* 135:60-63.

Pridham, J.B. y Woodhead, S. (1977) The biosynthesis of melanin in *Alternaria*. *Phytochemistry* 16:903-906.

Reyes-Ruiz, M., Chavez, C.E., Aceves, H., Hernandez, M.S., Vazquez, R., y Nuñez, P.G. (2012) Dynamics of escaping Earth ejecta and their collision probabilities with different Solar System bodies. *Icarus* 220:777-786.

Scharf, C.A. (2009) Extrasolar planets and astrobiology. *University Science Books*..

Schuerger, A.C., Golden, D.C., y Ming, D.W. (2012) Biototoxicity of Mars soils: 1. Dry deposition of analog soils on microbial colonies and survival under Martian conditions. *Planet Space Sci* 72:91–101

Schuerger, A.C. y Nicholson, W.L. (2006) Interactive effects of hypobaria, low temperature, and CO₂ atmospheres inhibit the growth of mesophilic *Bacillus* spp. under simulated martian conditions. *Icarus* 185:143-152.

Schuerger, A.C., Richards, J.T., Newcombe, D.A., y Venkateswaran, K. (2006) Rapid inactivation of seven *Bacillus* spp. under simulated Mars Irradiación UV. *Icarus* 181:52-62.

Schuerger, A.C., Ulrich, R., Berry, B.J., y Nicholson, W.L. (2013) Growth of *Serratia liquefaciens* under 7 mbar, 0°C, and CO₂-enriched anoxic atmospheres. *Astrobiology* 13:1-17.

Selbmann, L., Egidi, E., Isola, D., Onofri, S., Zucconi, L., De Hoog, G.S., Chinaglia, S., *et al.* (2013) Biodiversity, evolution and adaptation of fungi in extreme environments. *Plant Biosyst* 147:237-246.

Selbmann, L., Isola, D., Zucconi, L., y Onofri, S. (2011) Resistance to UV-B induced DNA damage in extreme-tolerant cryptoendolithic Antarctic fungi: detection by PCR assays. *Fungal Biol* 115:937-944.

Sidel, F.F.B., Bouziane, H., del Mar Trigo, M., El Haskouri, F., Bardei, F., Redouane, A., Kadiri, *et al.* (2015) Airborne fungal spores of *Alternaria*, meteorological parameters and predicting variables. *Int J Biometeorol* 59:339–346.

Singh, D.B. (1980) Effect of culture media, pH and temperature on growth behavior of *Alternaria brassicae* and *Drechslera graminea*. *Proc Indian natn Sci Acad* B46:393-396.

Smith, D.J. (2013) Microbes in the upper atmosphere and unique opportunities for astrobiology research. *Astrobiology* 13:981-990.

Stanley, R.G. y Linskens, H.F. (1974) Pollen: Biology, Biochemistry, Management. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg* Volume 1.

Steffen, J.H. y Li G. (2016) Dynamical considerations for life in multi-habitable planetary systems. *Astrophys J* 816:1-10.

Sterflinger, K., Tesei, D., y Zakharova K. (2012) Fungi in hot and cold deserts with particular reference to microcolonial fungi. *Fungal Ecol* 5:453-462.

Stern, J.C., Sutter, B., Freissinet, C., Navarro-González, R., McKay, C.P., Archer P.D.Jr., Buch, A., *et al.* (2015) Evidence for indigenous nitrogen in sedimentary and aeolian deposits from the *Curiosity* rover investigations at Gale crater, Mars. *PNAS* 112:4245-4250.

Stierle, A.A., Stierle, D.B., y Kelly, K. (2006) Berkelic acid, a novel spiroketal with selective anticancer activity from an acid mine waste fungal extremophile. *J Org Chem* 71:5357-5360.

Taubner, R.S., Schleper, C., Firneis, M.G., y Rittmann, S.K.M.R. (2015) Assessing the ecophysiology of methanogens in the context of recent astrobiological and planetological studies. *Life* 5:1652-1686.

Tosca, N.J. y Knoll, A.H. (2009) Juvenile chemical sediments and the long term persistence of water at the surface of Mars. *Earth Planet Sci Lett* 286:379-386.

Turtola, S., Rousi, M., Pusenius, J., Yamaji, K., Heiska, S., Tirkkonen, V. *et al.* (2006) Genotypic variation in drought response of willows grown under ambient and enhanced UV-B radiation. *Environ Exp Bot* 56:80-86.

Ulevičius, V., Pečiulytė, D., Lugauskas, A. y Andriejauskienė, J. (2004), Field study on changes in viability of airborne fungal propagules exposed to UV radiation. *Environ Toxicol* 19:437–441.

Vaquera, S., Patriarca, A. y Fernández Pinto, V. (2014) Water activity and temperature effects on growth of *Alternaria arborescens* on tomato medium. *Int J Food Microbiol* 185:136-139.

Wallis, M.K. y Wickramasinghe, N.C. (2004) Interstellar transfer of planetary microbiota. *Mon Not R Astron Soc* 348:52–61.

Webster, C.R., Mahaffy, P.R., Atreya, S.K., Flesch, G.J., Mischna, M.A., Meslin, P., Farley, K.A., *et al.* (2015) Mars methane detection and variability at Gale crater. *Science* 347:415-417.

Wells, L.E., Armstrong, J.C., y Gonzalez, G. (2003) Reseeding of early Earth by impacts of returning ejecta during the late heavy bombardment. *Icarus* 162:38-46.

Westall, F., Loizeau, D., Foucher, F., Bost, N., Bertrand, M., Vago, J., y Kminek, G. (2013) Habitability on Mars from a microbial point of view. *Astrobiology* 13:887-897.

Wheeler, K.A., Hurdman, B.F. y Pitt, J.I. (1991) Influence of pH on the growth of some toxigenic species of *Aspergillus*, *Penicillium* and *Fusarium*. *Int J Food Microbiol* 12:141-150.

Wickramasinghe, N.C., y Trevors, J.T. (2013) Non-terrestrial origin of life: a transformative research paradigm shift. *Theory Biosci* 132:133-137.

Worth, R.J., Sigurdsson, S., y House, C.H. (2013) Seeding life on the moons of the outer planets via lithopanspermia. *Astrobiology* 13:1155-1165.

Yen, A.S., Kim, S.S., Hecht, M.H., Frant, M.S., y Murray, B. (2000) Evidence that the reactivity of the Martian soil is due to superoxide ions. *Science* 289:1909-1912.

Zajc, J., Džeroski, S., Kocev, D., Oren, A., Sonjak, S., Tkavc, R., y Gunde-Cimerman, N. (2014) Chaophilic or chaotolerant fungi: a new category of extremophiles? *Front Microbiol* 5:1-15.

Zakharova, K., Sterflinger, K., Razzazi-Fazeli, E., Noebauer, K., y Marzban, G. (2014) Global proteomics of the extremophile black fungus *Cryomyces antarcticus* using 2D-electrophoresis. *Nat Sci* 6:978-995.

Apéndice.

Abreviaturas utilizadas:

CM, crecimiento medio.

CG-MS, Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

DCM, diferencia de crecimientos medios.

FAPP, fracción de área de placa de Petri.

SAM, Sample Analysis at Mars.

UV, ultravioleta.