

LA TERRAFORMACIÓN DE OTROS MUNDOS: UNA BREVE EXPOSICIÓN CON ESPECIAL ÉNFASIS EN LOS ASPECTOS CLIMÁTICOS

David QUINTERO

Delegación Territorial de AEMET en Canarias Oriental

RESUMEN: En este artículo se hablará de la terraformación, esto es, la adaptación de planetas a condiciones de habitabilidad adecuadas a los seres humanos en nuevos mundos. El término tuvo su origen en la ciencia ficción, pero desde finales del siglo pasado ha despertado un interés cada vez mayor por parte de la comunidad científica y es, hoy por hoy, una respetable materia de estudio. Hablar de terraformación es, en gran parte, hablar de ciencia atmosférica, ya que será una atmósfera idónea la que permita a una hipotética colonia de seres humanos establecerse en un nuevo mundo. Tras una breve historia del término terraformación, se pasará a discutir los posibles hábitats susceptibles de experimentar este proceso, mostrando que las posibilidades más realistas son aquellas que se aplican a planetas con estructura geológica y morfológica lo más parecida posible a la Tierra, para llegar a un caso arquetípico de terraformación: el planeta Marte; se discutirán brevemente sus actuales características físicas (con especial énfasis en su clima) y se comentarán las diversas opciones que autores de renombre han propuesto para convertir Marte en un mundo adaptado a la supervivencia de los seres humanos. La colaboración terminará enumerando algunas conclusiones de todo lo comentado, sin olvidar el muy interesante problema ético asociado a la terraformación.

1. BREVE HISTORIA DE LA TERRAFORMACIÓN

La palabra terraformación apareció por primera vez en la historia *Collision Orbit* del autor de ciencia ficción Jack Williamson, aunque parece razonable asumir que el concepto estaba, de forma más o menos consciente, en la mente de algunos pioneros de la astronáutica de finales del siglo XIX, o incluso antes. A finales del siglo XIX algunos visionarios, como Konstantin Tsiolkovsky, ya señalaron la importancia de la exploración del espacio exterior para que la especie humana tenga un futuro. Del propio Tsiolkovsky es la memorable cita “*la Tierra es la cuna de la humanidad, pero la humanidad no puede estar siempre en la cuna*”. Parece claro que una exploración que se queda en una mera visita y vuelta al hogar terrestre, si bien adecuada como primera etapa de la humanidad en el universo, sería insuficiente para los planes a largo plazo de supervivencia de la especie. Establecer hogares adecuados para los seres humanos es requisito imprescindible.

Entre las primeras menciones (implícitas) de la terraformación estarían los comentarios del astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli, quien afirmó a finales del siglo XIX que en Marte parecía haber unas estructuras en forma de canales. Percival Lowell propuso que los habitantes de Marte los podrían estar utilizando para transportar agua desde los polos a las regiones ecuatoriales. Hoy se sabe que dichos canales no existen y que fueron simples ilusiones ópticas, pero el concepto de ingeniería planetaria a gran escala quedó por primera vez mencionado (FOGG, 2013).

Se desea ahora hacer un inciso para señalar algo importante. Siguiendo a Martyn J. Fogg, quizá uno de los mayores expertos mundiales en terraformación, es preciso diferenciar

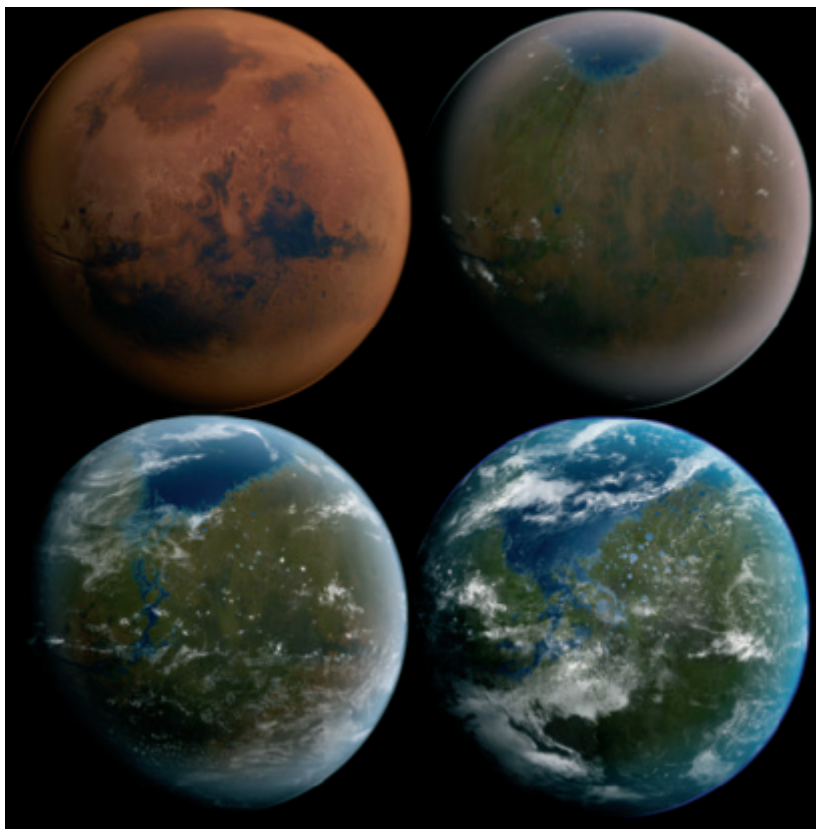


Figura 1. Representación artística de la terraformación de Marte.
(Realizada por Daein Ballard, imagen original en Wikipedia como:
Image:MarsTransitionV.jpg, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=939978>).

claramente entre terraformación y geoingeniería. La terraformación, como ya se ha indicado en el resumen, busca crear condiciones de habitabilidad adecuadas para los seres humanos en nuevos mundos. La geoingeniería buscaría, según Fogg: *“reparar biosferas estresadas en un planeta ya habitado”* y dado el prefijo “geo-” se estaría hablando de la Tierra. Sin duda alguna, la geoingeniería es un tema fascinante en sí mismo y quizá haya que recurrir a él en un futuro no muy lejano, pero no es el propósito de este artículo.

La lista de contribuciones a la terraformación fue creciendo en el siglo XX, combinando a científicos profesionales con escritores de ciencia ficción (así sigue siendo en la actualidad). En el lado de la ciencia podemos destacar al legendario astrónomo y divulgador Carl Sagan, quien en un trabajo altamente especulativo (SAGAN, 1961) propuso terraformar Venus mediante una siembra de microorganismos en su atmósfera que redujesen el contenido de dióxido de carbono, disminuyendo el efecto invernadero del planeta. Hoy se sabe que las características de Venus no hacen posible este plan, pero en su propuesta Sagan anticipó algo que luego muchos autores han acabado por aceptar como una parte esencial del proceso de terraformación: el utilizar la biología, probablemente modificada, como apoyo.

Tras los primeros visionarios, y con el advenimiento de la carrera espacial, el concepto pasó a formalizarse, estando presente aunque no fuera específicamente nombrado. Por

ejemplo, la *US National Commission on Space* afirmó que “*las adecuadas ambiciones a largo plazo del programa espacial civil de los EE. UU. deben ser el establecer sociedades libres en nuevos mundos [...] desde las tierras altas de la Luna a las planicies de Marte*” (FOGG, 2013). En 1979 James Oberg, de la NASA, organizó el primer coloquio sobre terraformación y un par de años después Christopher McKay, otra figura capital en el tema, escribió el artículo “*Terraforming Mars*”, siendo la primera vez que la palabra *terraforming* aparecía en el título de un artículo científico. Las dos últimas grandes aportaciones que se quieren mencionar son las del libro *The Greening of Mars*, de James Lovelock (el autor de la hipótesis de Gaia) y Michael Allaby. Lovelock propuso utilizar los temidos clorofluorocarbonos (CFC) para calentar Marte, en un alarde de originalidad y transgresión (ya que en la Tierra los CFC son los responsables del agujero de la capa de ozono). La última gran contribución a esta materia es probablemente el libro de Martyn J. Fogg *Terraforming, Engineering Planetary Environments*, texto absolutamente esencial y de lectura obligatoria para todo aquel interesado en serio en el problema de la terraformación.

2. PLANETAS A TERRAFORMAR

Si ya se tiene claro que terraformar es un paso esencial en el desarrollo y la supervivencia a largo plazo del ser humano como especie, la siguiente pregunta a plantear es: ¿qué planetas se deben intentar colonizar? Lo lógico sería empezar por el Sistema Solar, un primer campo de prueba. Aunque Venus es el planeta que suele estar más cercano a la Tierra, su elevadísima presión atmosférica, sus nubes de ácido sulfúrico concentrado y sus altas temperaturas lo convierten en un reto de gran dificultad. Más sencillo y más natural sería empezar por el segundo vecino más cercano a la Tierra: el planeta Marte, y de hecho un significativo porcentaje de los trabajos publicados en terraformación se han centrado en el planeta rojo. Sin embargo, antes de pasar a hablar de él, aunque sea por encima, se mencionarán otros planetas y se mostrarán las dificultades inherentes para su terraformación.

2.1. Gigantes gaseosos

Los gigantes gaseosos, que en el Sistema Solar serían Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, son frecuentes en los sistemas estelares con planetas. Tienen el obvio problema de que no disponen de una superficie sólida en la que asentarse, con la excepción del núcleo, que estaría a una presión atmosférica tan elevada que un asentamiento queda totalmente descartado. Una posible solución serían los *chthonian planets*, los planetas que han perdido la envoltura más externa de gases en lo que se conoce como escape hidrodinámico, dejando atrás un núcleo desnudo. Esta pérdida de la envoltura gaseosa más externa puede deberse a que estos planetas estarían demasiado cerca de su estrella (o estrellas) y el viento estelar despoja del gas al planeta. En este caso el planeta sería válido para una terraformación pero, debido a que la cercanía a una estrella implicaría elevadas dosis de radiación (esto pasa también con algunos gigantes como Júpiter), y dado que no hay ejemplos de este tipo de planetas en el Sistema Solar y que su existencia es aún hipotética, los gigantes gaseosos quedan descartados. Aunque estar cerca de ellos puede suministrar volátiles necesarios, no se estaría hablando de terraformación propiamente dicha.

Como curiosidad, algunos autores especulan que si la presencia de carbono en estos planetas es habitual, al ser este más pesado que los gases, sedimentaría hacia el núcleo y una vez allí, debido a las elevadísimas presiones, cristalizaría formando diamante. Los mayores diamantes del universo serían los núcleos de los gigantes gaseosos.

2.2. Planetas oceánicos

Los planetas constituidos exclusivamente por un único océano son frecuentes en los escenarios de la ciencia ficción. A bote pronto se pueden poner los ejemplos de la película *Interstellar*, o el de la película y novela *Solaris*. Un planeta oceánico no tendría un suelo como tal en el que asentarse, aunque eso podría ser arreglado de forma sencilla, a diferencia del caso de los planetas gigantes gaseosos. Si un planeta está en la llamada zona de habitabilidad¹ no es en absoluto descabellado que tenga agua, y es probable que gran parte de las masas continentales o la totalidad de ellas estén sumergidas (en la Tierra los océanos dominan las tres cuartas partes de la superficie). Sin embargo, y como algunos autores han resaltado (PIERREHUMBERT, 2005), los planetas oceánicos son extremadamente inestables desde el punto de vista climático. Al no tener corteza emergida no hay ciclo silicatos-carbonatos, esto es, la parte del ciclo del carbono en la que se interacciona con la litosfera. Muy resumidamente, este ciclo capta CO₂ del aire y lo disuelve formando ácidos carbónicos; mucho tiempo después estos carbonatos experimentan subducción hacia las profundidades de la corteza del planeta, donde se recombinan con silicatos y liberan CO₂ que será expulsado a través de vulcanismo de nuevo a la atmósfera; el proceso dura millones de años. No es realmente un ciclo cerrado: en la Tierra, por ejemplo, la formación de carbonatos ha sido superior a la de silicatos, lo que se ha traducido en una reducción neta del CO₂ a lo largo de la historia (aunque esta tendencia se está revirtiendo en las últimas décadas). En un planeta oceánico, al principio de su historia, bajo un sol débil, la evaporación es limitada, el CO₂ se elimina muy efectivamente por el océano pero no es liberado por la litosfera (no hay litosfera, como se ha indicado), así que el planeta se enfría a gran velocidad, entrando en una era de hielo e incluso en una *snowball*. En una etapa más posterior, con un sol más brillante, la evaporación aumentaría sustancialmente, el vapor de agua se incrementaría y aunque parte de este vapor de agua es fotodisociado en dos átomos de hidrógeno (que por ser muy ligeros escaparían al espacio) y en un átomo de oxígeno, habría una gran capacidad de absorber radiación infrarroja, aumentaría el efecto invernadero y la gran disponibilidad de este gas en un planeta que es todo un océano dispararía un proceso de *runaway greenhouse effect*, un efecto invernadero descontrolado, como lo que se especula que sucedió en Venus².

Así pues, los planetas oceánicos son muy volátiles y quedan de momento descartados (además de que no hay ninguno en el Sistema Solar). Curiosamente, los modelos muestran que los planetas desérticos tienen una mayor zona de habitabilidad que los oceánicos (CHOI, 2011) y son más estables climáticamente.

2.3. Planetas de carbono, hierro y otras composiciones exóticas

Esta clase de planetas pertenece todavía al reino de la teoría (con la excepción de los planetas de hierro), aunque los argumentos para pensar que existen son fuertes. Algunos *chthonian planets* podrían ser un ejemplo, aunque la vía de formación sea diferente a la

¹ La zona de habitabilidad se define como aquella región en torno a una estrella en la cual es posible tener agua líquida en la superficie de un planeta o satélite rocoso. Esto depende de muchísimos factores, entre los que influyen las características de la atmósfera del planeta, sus parámetros orbitales, los calentamientos de marea, etc. Algunos autores proponen condiciones extra, como por ejemplo que la presión atmosférica sea superior a 6,1 milibares para que tenga lugar el punto triple del agua de 273,16 kelvines, donde coexisten los estados sólido, líquido y gaseoso.

² No es la intención de este artículo asustar a nadie. El IPCC estima que es imposible que un *runaway greenhouse effect* tenga lugar en la Tierra por causas humanas. El efecto invernadero aumenta en la Tierra y produce el calentamiento global, pero no de esas formas tan extremas.

que normalmente se considera para un planeta de carbono o de hierro. Un planeta de carbono se formaría cuando el disco de formación protoplanetaria tuviera una composición más rica en carbono que en oxígeno. El Sistema Solar era rico en oxígeno y en silicio, lo que formó silicatos, que es la composición principal de los planetas rocosos. La excepción es Mercurio, un llamado “planeta de hierro”. Estos cuerpos tienden a formarse cerca de la estrella, que es el lugar donde este elemento se acumula. Algunos modelos del universo temprano (PULLIAM, 2016) sugieren que la primera vida comenzó en planetas de carbono. No es del todo extraño, al fin y al cabo, el carbono es el elemento esencial para la vida (algunos autores defienden también al silicio, aunque esto está bastante discutido). Eso sí, las atmósferas de estos mundos estarían constituidas principalmente por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), así que una eventual terraformación implicaría una renovación radical de la composición atmosférica.

En teoría sería posible terraformar estos planetas. Los planetas de hierro, que tenderían a estar cerca de una estrella (aunque tal vez no todos), presentarían problemas asociados a las elevadas temperaturas y la radiación electromagnética, que harían difícil mantener una atmósfera pero, aparte de este caso, los otros planetas son en teoría terraformables. No obstante, y por razones que ya se han comentado, este artículo se centrará en el Sistema Solar, en concreto en el planeta Marte.

3. MARTE

Marte no solo ha estado desde los orígenes en la diana de los terraformadores, sino que pronto superó a su principal competidor, Venus, cuando se conocieron las verdaderas condiciones atmosféricas de este planeta. Hoy en día hay dos proyectos muy serios de viaje a Marte (aunque no de terraformación) que demuestran el interés que el planeta sigue despertando. Son: *Mars Direct*, de Robert Zubrin y sobre todo el proyecto de la empresa SpaceX de Elon Musk.

3.1. Marte hoy

Al igual que la Tierra o Venus, Marte ha tenido una historia geológica, de la cual se podría hablar mucho. Uno de los detalles más importantes es el de si hubo agua en el pasado y en qué cantidad. En este aspecto se está cada vez más convencido de que así fue y de que los océanos llegaron a ocupar casi un tercio de la superficie. Sin embargo, el Marte actual es un lugar, al menos en su superficie, claramente inhóspito. Su tenue atmósfera hace que tenga, en promedio, alrededor de la milésima parte de la presión atmosférica de la Tierra. Las razones de una atmósfera tan escasa son fundamentalmente dos: por un lado, una gravedad débil (un 40 % de la de la Tierra) y por otro lado la ausencia de magnetosfera. Que no exista magnetosfera hace que las partículas del viento solar no sean deflectadas y puedan incidir en la atmósfera, “podándola”, por así decirlo, lenta pero inexorablemente. La ausencia de magnetosfera no implica que no pueda haber atmósfera: Venus no tiene magnetosfera y tiene una densa atmósfera, pero su fuerza de gravedad es mucho mayor.

La temperatura en Marte fluctúa mucho, pudiendo llegar a centenares de grados bajo cero o a 30 °C en verano en zonas ecuatoriales. Los vientos no es raro que sean intensos y las tormentas de polvo suceden con cierta frecuencia (pueden llegar a envolver el planeta entero). A pesar de la tenue atmósfera, es fácil encontrar que las velocidades del viento lleguen a 60 o 90 km/h. Si se asume un equilibrio entre la fuerza por diferencia de presión

y la fuerza de Coriolis (la rotación de Marte es similar a la de la Tierra), el llamado equilibrio geostrófico (¿o habría que decir “marstrófico?”) sería:

$$\vec{V}_g = \frac{1}{\rho} \hat{k} \times \nabla_z p$$

Y dado que la densidad es tan baja en Marte, aunque las diferencias de presión (el gradiente del segundo miembro) sean pequeñas, la densidad hace aumentar el cociente, arrojando valores importantes de viento. Otra cosa es la capacidad que tiene ese viento de ejercer una fuerza, por ejemplo, para mover las aspas de un molino de viento: esta capacidad estaría muy reducida en Marte incluso tomando las velocidades de vientos propias de tormentas de arena. Esto es debido a que el término de lo que se conoce como presión dinámica ($\frac{1}{2}\rho V^2$) es muy bajo, de nuevo por causa de la baja densidad.

El característico tono rojizo del aire en Marte se debe a la presencia de óxidos de hierro como limonita o magnetita en el aire. Estas partículas tienen ya un considerable tamaño y las leyes de la dispersión según Rayleigh no se les aplican; al ser el diámetro de las partículas del tamaño de la longitud de onda de la luz se estaría entrando en el régimen de Mie (Rayleigh se aplica cuando los diámetros son mucho más pequeños que la longitud de onda como, por ejemplo, en la atmósfera de la Tierra). La composición de la atmósfera es en un 95 % o más de CO₂, seguido por N₂ y argón. De oxígeno y vapor de agua apenas habría trazas. Además, hay que tener en cuenta que, debido a la baja gravedad, Marte no puede retener algunos gases, como se ve en la figura 2.

La ausencia de campo magnético hace que los rayos cósmicos incidan en Marte, además de las partículas de viento solar; también, y debido a que no hay oxígeno suficiente como para una capa de ozono, la radiación ultravioleta llega sin impedimentos al suelo. Estos efectos se mitigan un poco por la distancia de Marte al Sol, pero aun así la dosis diaria que absorbería un astronauta en la superficie de Marte sería bastante mayor que en la Tierra, y esto es algo que a la larga habría que corregir.

Por último, no se quiere dejar de mencionar el descubrimiento de la presencia de agua en Marte. Ya se sabía que en los casquetes polares había agua en forma helada, pero se sospecha que a nivel subterráneo existen acuíferos por los que el agua podría correr en forma líquida. Por otro lado, son muchos los indicios que apuntan a que en Marte en el pasado pudo haber océanos de gran tamaño. Hoy por hoy, sin embargo, en la superficie, debido a la baja presión, el agua se sublimaría o se

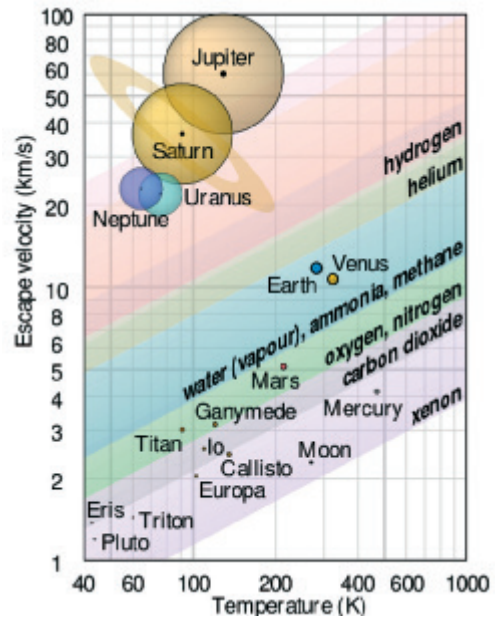


Figura 2. Velocidad de escape de diferentes gases según la temperatura y gravedad del planeta. (Realizada por Cmglee, Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=42449252>).

congelaría de inmediato, dependiendo de la temperatura. Sin embargo, a finales de 2015, la NASA encontró evidencias bastante fuertes de pequeñas corrientes de agua durante el verano marciano en las laderas de montes o montañas. Sería un agua muy salada, lo que disminuiría mucho su punto de congelación, permitiendo su presencia en forma líquida, al menos durante un tiempo. Un gran descubrimiento que estimuló las posibilidades de vida microbiana en Marte (algunos organismos de tipo extremófilo podrían aguantar las duras condiciones de su suelo).

3.2. Terraformando Marte

En esta sección se seguirá a Martyn J. Fogg, quizá la mayor autoridad mundial en terraformación, y su excepcional libro (FOGG, 2013). Para terraformar Marte, Fogg propone cinco modificaciones clave: aumentar la temperatura en superficie, incrementar la presión, cambiar la composición química del aire, humedecer la superficie y reducir el flujo de rayos ultravioletas incidentes. Estos cinco pasos formarían parte de tres etapas que según Fogg serían: ecopoiesis, terraformación total y finalización. Fogg estima en un mínimo de diez mil años el tiempo para terraformar Marte.

3.2.1. Ecopoiesis

Una primera aproximación podría ser la ecopoiesis, es decir, la creación de un ecosistema sostenible, aunque este ecosistema sea aún insuficiente para la presencia humana. Plantas y bacterias modificadas genéticamente podrían allanar el camino para los seres humanos, incluso sin necesidad de grandes obras de ingeniería genética, al fin y al cabo hay líquenes y cianobacterias que son capaces de resistir dosis altísimas de radiación ultravioleta.

En esta etapa se aumentaría la insolación sobre Marte para elevar la temperatura. Una propuesta para lograr esto es colocar un espejo de grandes dimensiones en órbita, una tarea que requeriría de una labor de ingeniería nada trivial: habría que lograr un equilibrio entre la fuerza gravitatoria, la fuerza centrípeta y la presión de radiación ejercida sobre el espejo, que debido a sus dimensiones no podría descartarse. Este espejo se emplearía para fundir los casquetes de hielo marcianos con la consecuente liberación de CO₂ (el principal componente de estos casquetes). El mero aumento de la insolación se calcula en un forzamiento radiativo estimado de 7,5 °C (FOGG, 2013), que podría incrementarse con los posibles ciclos de *feedbacks* o realimentaciones.

Sin embargo, este aumento de la temperatura es del todo insuficiente. Se pueden liberar gases con un potente efecto invernadero, a ser posible *“inertes, resistentes a la fotodisociación, no tóxicos, elaborados a partir de elementos de Marte y respetuosos con una eventual capa de ozono”* (FOGG, 2013). Ciertos compuestos fluorados, como el SF₆ o los perfluorocarbonos podrían servir. Pero todo esto es aún insuficiente. Para conseguir que Marte tenga una temperatura próxima a la de la Tierra habría que liberar el CO₂ encerrado en el regolito³. Se ha propuesto el uso de armas nucleares para liberar dicho CO₂, aunque se tendría el eterno problema de los residuos radiactivos. Si se aceptan niveles tecnológicos aún lejanos pero en principio no imposibles se puede considerar la propuesta del original físico Freeman Dyson (DYSON, 1981) de usar máquinas de Von Neumann, máquinas capaces de ejecutar labores y de replicarse como un enjambre de seres robóticos. Estas máquinas

³ El regolito es una capa de suelo de diversos materiales asentada sobre un lecho de roca sólida.

se podrían soltar en Encélado, la luna de Saturno⁴, donde capturarían el hielo de este planeta y regresarían a Marte usando velas solares. En Marte caerían simulando un bombardeo de cometas como ocurrió en la Tierra, lo que además de liberar el CO₂ del regolito marciano aportaría agua para futuros océanos, algo muy deseable.

Otra opción es la de (ZUBRIN y MCKAY, 1993): desviar asteroides del exterior del Sistema Solar para que golpeen Marte. Estos asteroides, ubicados en el Cinturón de Kuiper, son más sencillos de perturbar y dirigir que asteroides en órbitas más interiores, y además se supone que contienen amoníaco helado en grandes cantidades. El amoníaco se calentaría con el impacto y se convertiría en gas, y es un gas con potente efecto invernadero. Zubrin y McKay estiman que con cuarenta impactos de asteroides de amoníaco se doblaría la cantidad de nitrógeno en la atmósfera y se cubriría un cuarto del planeta con un metro de agua de profundidad. El problema de esta idea es, como los propios autores reconocen, que el amoníaco tiene un tiempo de vida característico de menos de un siglo antes de ser disociado por fotólisis, así que habría que mantener un bombardeo continuo. Para evitar esto, tras la etapa inicial de bombardeo, Zubrin y McKay proponen utilizar poblaciones de bacterias que aprovechan el nitrógeno y el oxígeno y expulsan amoníaco.

3.2.2. Terraformación total

En una segunda etapa el objetivo sería llevar a cabo la terraformación definitiva del planeta Marte. Las condiciones en superficie deberían ser lo más parecidas posibles a las de la Tierra. Tras la ecoipoiesis se debería tener un planeta con una temperatura cercana al punto de congelación del agua y una tenue atmósfera con una elevada proporción de CO₂. Habría que disminuir el CO₂ y aumentar el oxígeno: entran aquí en juego las plantas. Como es sabido, en su proceso de respiración, las plantas hacen justamente eso. La reducción del CO₂ es importante ya que no puede respirarse si está en altas proporciones: a partir del 2 % de CO₂ se empiezan a notar efectos nocivos en el cuerpo y, aunque varía según el tiempo de exposición, con concentraciones cercanas al 10 % es prácticamente letal. Tampoco conviene aumentar a lo loco la proporción de oxígeno. Con mucho oxígeno la atmósfera se vuelve muy inflamable y puede llegar a haber combustiones casi espontáneas. Los valores ideales, como se dijo al principio, son los más próximos a los que hay en la Tierra (que al fin y al cabo es donde el ser humano ha evolucionado). Para conseguir aumentar la presión atmosférica habría que recurrir a gases relativamente inertes y, al igual que en la Tierra, el nitrógeno molecular, N₂, es un candidato ideal.

El inicio de esta etapa (o el final de la anterior) sería el momento idóneo para proteger Marte del viento solar y los rayos cósmicos. Esta protección no solo es necesaria para no dañar formas de vida complejas que no sean tan resistentes a la radiación como ciertas bacterias, sino que también protegería la atmósfera de Marte del efecto de “poda” que le produce el viento solar. Este efecto de “poda” es un proceso lento pero acabaría por dejar una atmósfera muy tenue, de nuevo, si no se rellena con más gases de vez en cuando. Dado que Marte no tiene campo magnético quizá se pueda crear uno de forma artificial. En este sentido es muy sugerente la recientísima propuesta de Jim Green, científico de la NASA, que sugiere colocar un potente imán (de 1 a 2 teslas) en el punto orbital de

⁴ Más cercano y también cubierto de hielo está el satélite Europa de Júpiter. Sin embargo, es posible que Dyson prefiera Encélado dado que existe una cierta posibilidad de que Europa albergue algún tipo de vida, con las implicaciones éticas que ello conllevaría.

Lagrange L1⁵. Este punto, situado entre Marte y el Sol, es ideal para colocar un imán que quiera proteger a Marte con su campo magnético. El campo magnético producido por el imán es barrido por el viento solar, pero el planeta quedaría a resguardo en la magnetopausa y magnetocola. Se tendría una situación similar a la de la Tierra y su campo magnético natural. Si bien se estaría hablando de un imán potente y de grandes dimensiones, en la Tierra hay imanes que generan intensidades de campo magnético mucho mayores, como los más de 10 teslas del LHC en el CERN.

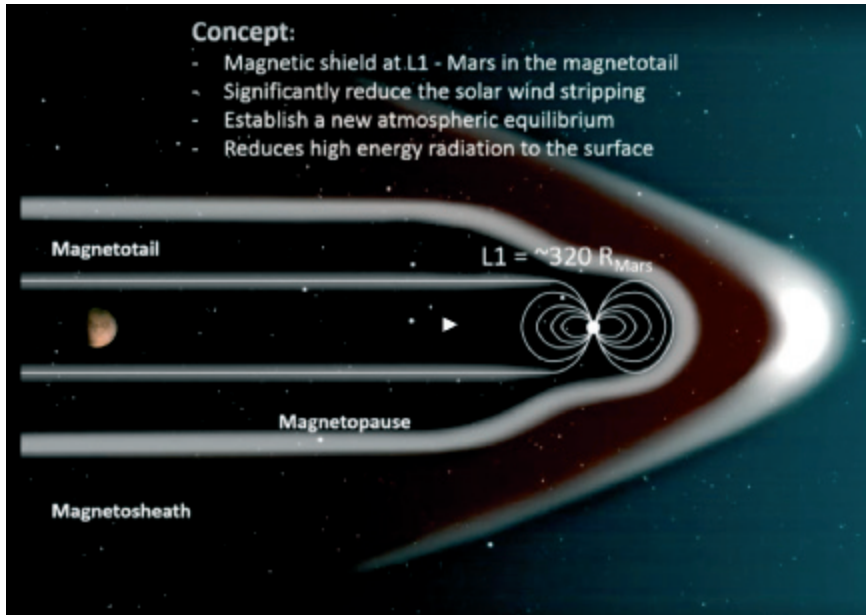


Figura 3. Escudo magnético en L1 en órbita alrededor de Marte.

(Realizado por Jim Green, NASA, en el dominio público:

<http://pop.h-cdn.co/assets/17/09/1488399162-screen-shot-2017-03-01-at-31220-pm.png>).

Si además se consigue tener océanos, aunque sean de pequeño tamaño, la evaporación del vapor de agua aportaría un potente gas de efecto invernadero y humidificaría el aire y el suelo, algo que las plantas (y los seres humanos) agradecerían. La presencia de océanos, si bien no estrictamente imprescindible para la terraformación, sí sería muy deseable.

3.2.3. Finalización

La finalización de un proceso de terraformación es probablemente un estado asintótico, no un punto de llegada definitivo, máxime en el caso de Marte, en el que como se ha visto, al no disponer de campo magnético y tener una gravedad tan débil, su atmósfera es lentamente

⁵ Los cinco puntos orbitales de Lagrange son lugares en los cuales un cuerpo permanecería en un estado más o menos estable. Son, por tanto, ideales para colocar satélites de observación o sondas que tomen medidas. L1 estaría en una línea recta entre Marte y el Sol y sería el lugar en el que se anula la fuerza de atracción gravitatoria entre estos dos cuerpos. Hay que decir que los puntos de Lagrange no tienen todos el mismo grado de estabilidad; de hecho L1 es uno de los puntos de equilibrio inestable, lo que conlleva que una nave allí situada tendría que llevar a cabo continuos ajustes para no perder su ubicación.

barrida por el viento solar. Hay autores que sugieren que la ausencia de una dinámica de placas tectónicas en Marte implica una ausencia de un ciclo silicatos-carbonatos, lo que terminaría por mineralizar la atmósfera. Mineralizar la atmósfera significa que todo el oxígeno y el dióxido de carbono se acabarían combinando con el silicio de las rocas de la superficie; al no haber emisiones volcánicas o de otro tipo estos gases no se repondrían y al cabo de muchos años la atmósfera marciana sería una parte más de la litosfera.

Parece claro que para terraformar Marte será imprescindible que los seres humanos mantuviesen un papel activo en todo momento, controlando y regulando los ciclos biogeoquímicos. Esto puede parecer un problema, pero en esencia es lo mismo que los seres humanos ya hacen (o deberían hacer) en la Tierra. Ser la especie con más poder tiene sus implicaciones.

4. CONCLUSIONES Y ASPECTOS ÉTICOS

Como se ha comprobado, la terraformación ha pasado de la ciencia ficción más *pulp* a discutirse en los congresos de astronomía y astronáutica. Especialistas de todo el mundo intercambian sus ideas al respecto y escriben artículos y libros sobre ella. Por supuesto, eso no significa que la terraformación sea una realidad o un objetivo cercano, pero sí parece claro que deberá ser un ingrediente de nuestro futuro si, parafraseando a Konstantin Tsiolkovsky, no queremos estar toda la vida en la cuna.

Por supuesto, la terraformación tiene importantes críticas de todo tipo, como los costes económicos o el gran nivel de desarrollo tecnológico necesario para abordar un proyecto así. Interesante es lo que dice el escritor Kim Stanley Robinson en su libro de ciencia ficción “dura” (basada en conceptos científicos) *Aurora* (ROBINSON, 2016): todo planeta terraformado no deja de ser un ejemplo de una “*small closed loop ecology*”, una ecología pequeña y cerrada tipo invernadero. Robinson cree que este tipo de sistema degenera rápido: las plantas crecen más despacio, las semillas son cada vez más pequeñas y de peor calidad, incluso las personas tienen más problemas y dolencias. En su libro, Robinson afirma que hay que regresar a la Tierra cada cierto tiempo para poder renovar y refrescar esas ecologías tipo invernadero. Hay que decir que estas ideas son controvertidas y que son una sugerencia y no una realidad demostrada, además de que al fin y al cabo la propia Tierra se puede entender como un invernadero a gran escala. No obstante, se ha querido incluir esta crítica por su originalidad.

En este artículo se han discutido las aproximaciones más realistas (y por tanto más cercanas) a la terraformación. Se ha trabajado en todo momento con la idea de que son los seres humanos quienes transforman Marte, aunque existe el enfoque de que sean los humanos los que se adapten a Marte, por ejemplo, con ingeniería genética. Esta es una aproximación muy válida y quizá muy necesaria el día de mañana, no solo para habitar Marte u otro planeta terraformado, sino incluso para los largos viajes espaciales.

Se ha asumido en todo momento que no hay cortapisas éticas a la terraformación, que los seres humanos pueden hacer lo que quieran en los mundos a los que lleguen. Sin embargo, hay opiniones que creen que se debe respetar cualquier planeta, que no se tiene derecho a modificar los medios naturales de otros mundos. Dado que la terraformación va de la mano con la supervivencia a largo plazo de la especie, se consideran exageradas estas afirmaciones. Más sutil es el caso de pretender terraformar un mundo en el que hay vida, por elemental que esta sea. En el caso de Marte este tipo de argumentos no tienen mucha fuerza ya que parece un mundo muerto, pero no siempre tiene por qué ser así. Es posible

que la humanidad llegue a un mundo un día en el que una forma de vida está prosperando y pueda, en un futuro lejano, evolucionar a entidades más complejas (o no). ¿Tendría derecho a interferir con formas de vida autóctonas, a privarles de su hábitat natural, vayan a evolucionar más o no? ¿Tal vez se podrían invadir mundos con bacterias y plantas pero no con animales superiores? ¿Y si la humanidad sufriera un caso de necesidad extrema, se podrían incluso eliminar seres evolucionados con el fin de asegurar la supervivencia? ¿Qué pensaría la humanidad si sucediera al revés?

Son preguntas muy difíciles a las que el autor de este artículo no tiene respuesta. Ahí quedan para que los seres humanos del presente y del futuro debatan sobre ellas durante años. En realidad, es normal que surjan estas preguntas y que sean tan difíciles de responder. La terraformación, como todas las grandes cuestiones, lleva al ser humano al borde no solo de sus capacidades técnicas, sino también a cuestiones puramente éticas.

REFERENCIAS

- CHOI, C. Q. (2011). *Alien Life More Likely on 'Dune' Planets, Study Suggests*, <https://www.space.com/12800-alien-life-desert-planets-habitable-zone.html>.
- DYSON, F. J. (1981). *Disturbing the Universe*, Basic Books.
- FOGG, M. J. (2013). *Terraforming. Engineering Planetary Environments*.
- PIERREHUMBERT, R. T. (2005). *Science Fiction Atmospheres*, https://users.physics.ox.ac.uk/~pierre-humbert/papers/BAMS_SFatm.pdf.
- PULLIAM, C. (2016). *Universe's First Life Might Have Been Born on Carbon Planets*, <https://www.cfa.harvard.edu/news/2016-12>, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.
- ROBINSON, K. S. (2016). Aurora, Editorial Minotauro.
- SAGAN, C. (1961). *The Planet Venus*, *Science*, Volume 133, Number 3456.
- ZUBRIN, R. y MCKAY, C. (1993). *Technological Requirements for Terraforming Mars* AIAA, SAE, ASME, and ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit, 29th, Monterey, CA, June 28-30, 14 p.