

## Habitar lo imposible: terraformación, arte, la imaginación de la trascendencia humana y el rol de los microorganismos

Ma Fernanda Díaz-Chávez<sup>1</sup> **iD**, Yolanda Elizabeth Morales-García<sup>1,2</sup> **iD**, Jesús Muñoz-Rojas<sup>1</sup> **iD**,  
María del Rocío Bustillos-Cristales<sup>1</sup> **iD**, Ximena Gordillo-Ibarra<sup>3\*</sup> **iD**, Jesús Mauricio Muñoz-  
Morales<sup>3\*\*</sup> **iD**

<sup>1</sup>Grupo “Ecology and Survival of Microorganisms”, Laboratorio de Ecología Molecular Microbiana, Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, Instituto de Ciencias Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. <sup>2</sup>Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. <sup>3</sup>Alianzas y Tendencias BUAP, Puebla, México.

Email de autores para correspondencia: \*[ximena.gordillo@aytbuap.mx](mailto:ximena.gordillo@aytbuap.mx); \*\*[mauricio.munoz@aytbuap.mx](mailto:mauricio.munoz@aytbuap.mx)

**Recibido:** 15 diciembre 2025. **Aceptado:** 30 diciembre 2025

### RESUMEN

La idea de terraformar otros planetas ha trascendido el ámbito de la ciencia especulativa para convertirse en un potente imaginario cultural que atraviesa el arte, la narrativa y la tecnología contemporáneas. Más allá de su viabilidad técnica, la terraformación funciona como un ensayo simbólico sobre los límites de lo humano, la transformación de entornos hostiles y la aspiración a la trascendencia.

La terraformación ha sido concebida tradicionalmente como un proyecto tecnológico orientado a transformar ambientes planetarios hostiles en espacios habitables para la humanidad. Sin embargo, más allá de su viabilidad técnica, este concepto ha adquirido una profunda dimensión simbólica en el arte, la narrativa y la reflexión filosófica contemporánea. En este manuscrito se explora la terraformación como metáfora cultural de la trascendencia humana, entendida no como dominación absoluta del entorno, sino como un proceso gradual de transformación y coexistencia.

Se propone que la vida microbiana, en particular las bacterias, constituye el fundamento biológico de cualquier proceso de habitabilidad planetaria, al haber sido las colonizadoras primarias de la Tierra y las arquitectas de los principales ciclos biogeoquímicos. Asimismo, se analizan ejemplos terrestres de ambientes extremos, como los desiertos, donde asociaciones funcionales entre microorganismos y plantas permiten la generación de microhábitats y la expansión de la vida bajo condiciones adversas. Estos sistemas microbio-planta se presentan como modelos análogos de terraformación a escala local, donde la cooperación biológica transforma lo inhóspito en un espacio de posibilidad. El presente trabajo propone una visión integradora en la que arte, tecnología y biología convergen para replantear el significado de habitar lo imposible.

**Palabras clave:** terraformación; vida microbiana; plantas; coexistencia; arte digital.

## ABSTRACT

The idea of terraforming other planets has moved beyond the realm of speculative science to become a powerful cultural imaginary that permeates contemporary art, narrative, and technology. Beyond its technical feasibility, terraforming functions as a symbolic rehearsal of the limits of the human condition, the transformation of hostile environments, and the aspiration toward transcendence.

Terraforming has traditionally been conceived as a technological project aimed at converting hostile planetary environments into habitable spaces for humanity. However, beyond its technical viability, this concept has acquired a profound symbolic dimension in contemporary art, narrative, and philosophical reflection. This manuscript explores terraforming as a cultural metaphor for human transcendence, understood not as absolute domination of the environment, but as a gradual process of transformation and coexistence.

It is proposed that microbial life, particularly bacteria, constitutes the biological foundation of any process of planetary habitability, having been the primary colonizers of Earth and the architects of the major biogeochemical cycles. In addition, terrestrial examples of extreme environments, such as deserts, are analyzed, where functional associations between microorganisms and plants enable the formation of microhabitats and the expansion of life under adverse conditions. These microbe–plant systems are presented as local-scale analogues of terraforming, in which biological cooperation transforms the inhospitable into a space of possibility. This work proposes an integrative vision in which art, technology, and biology converge to rethink the meaning of inhabiting the impossible.

**Keywords:** terraforming; microbial life; plants; coexistence; digital art.

## INTRODUCCIÓN

### Imaginar más allá de la Tierra

La terraformación es un proceso hipotético de modificación de un planeta para hacerlo habitable [1]; tanto para el humano como para soportar la vida terrestre. Desde sus primeras apariciones en la ciencia ficción, la terraformación ha sido concebida como la capacidad humana de transformar mundos ajenos en extensiones de la vida terrestre [2]. Sin embargo, en el contexto contemporáneo, esta idea ha dejado de ser exclusivamente un proyecto técnico para convertirse en un

lenguaje simbólico que interroga nuestra relación con el entorno, la tecnología y el porvenir (Figura 1) [3, 4].

El arte y la narrativa visual han encontrado en la terraformación un espacio fértil para reflexionar sobre la posibilidad de habitar aquello que, por definición, es imposible o inhóspito [5]. En este sentido, la representación artística no busca anticipar un futuro literal, sino explorar las condiciones filosóficas, emocionales y culturales de ese deseo de trascendencia [6, 7].





**Figura 1.** Representación conceptual de la terraformación como proceso simbólico de habitar lo imposible. La imagen ilustra la transición entre un entorno hostil, la intervención humana y la emergencia de un espacio de posibilidad, donde arte, tecnología y filosofía convergen para redefinir los límites de lo humano. Imagen generada con la ayuda de ChatGPT y descripción de los autores.

### **Terraformación como metáfora cultural**

Terraformar implica modificar un entorno hostil para hacerlo habitable, pero simbólicamente también significa redefinir los límites de lo humano. En el arte, esta noción se desplaza del terreno físico al conceptual: no se trata únicamente de alterar atmósferas o suelos [8], sino de transformar percepciones, identidades y formas de coexistencia [9, 10].

La metáfora de la terraformación refleja una

tensión constante entre dos impulsos: el deseo de dominar y adaptar el entorno a las necesidades humanas, y la necesidad de adaptarse a algo radicalmente distinto [11, 12].

Esta dualidad aparece recurrentemente en representaciones visuales donde paisajes alienígenas, arquitecturas imposibles o ecosistemas híbridos sugieren no una conquista total, sino un diálogo inestable entre humanidad y entorno [13].

## El arte como ensayo del futuro

El arte contemporáneo funciona como un laboratorio simbólico donde se ensayan futuros posibles. A diferencia de la ciencia o la ingeniería, el arte no está obligado a resolver problemas técnicos, sino a formular preguntas. En el caso de la terraformación, estas preguntas giran en torno a: ¿Qué significa habitar un lugar que no fue hecho para nosotros? ¿Hasta qué punto la transformación del entorno implica la transformación del propio ser humano? ¿Es la terraformación una extensión del colonialismo o una oportunidad para imaginar formas alternativas de coexistencia? [14–16].

Las representaciones artísticas de mundos terraformados suelen enfatizar lo ambiguo: paisajes bellos pero inquietantes, tecnologías orgánicas, cuerpos humanos modificados [17]. Estos elementos sugieren que habitar lo imposible requiere abandonar certezas y aceptar la mutación como condición de existencia [11, 18].

## Tecnología, narrativa y filosofía de la trascendencia

La narrativa tecnológica que rodea a la terraformación suele presentarla como un camino hacia la salvación o la continuidad de la especie [19]. Desde una perspectiva filosófica, la terraformación puede entenderse como un acto de trascendencia simbólica, donde la humanidad intenta superar sus límites biológicos, geográficos y temporales [20]. En este proceso, el espacio deja de ser únicamente un lugar físico y se convierte en un medio de

conexión, un territorio de posibilidades donde lo humano se redefine constantemente. Así, la tecnología no aparece solo como herramienta, sino como extensión de la imaginación, capaz de materializar deseos, miedos y contradicciones colectivas [21].

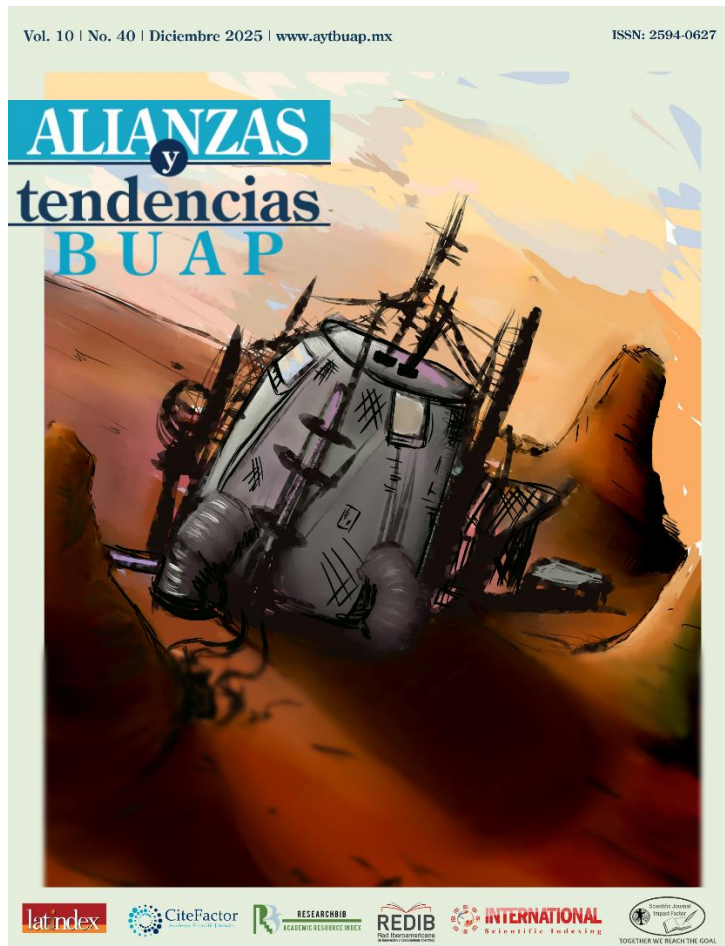
## Habitar lo imposible: del lugar hostil al espacio de posibilidad

Habitar lo imposible no implica eliminar totalmente la hostilidad del entorno, sino aprender a convivir con ella. En las representaciones artísticas, los planetas terraformados rara vez son versiones ideales de la Tierra; más bien, son espacios liminales donde la vida persiste en condiciones precarias, híbridas y cambiantes. Este enfoque sugiere que el verdadero acto de terraformar no es convertir otros mundos en copias del nuestro, sino aceptar la transformación mutua entre entorno y habitante. El espacio hostil se convierte entonces en un medio de conexión con nuevas formas de existencia, pensamiento y sensibilidad [22].

En el número 10, volumen 40 de Alianzas y Tendencias BUAP se muestra en la portada una representación artística que implica una fase para habitar lo imposible (Figura 2), esta fase representa la llegada humana a un nuevo planeta con toda la tecnología para iniciar la terraformación.

## Las bacterias y la terraformación

Antes de cualquier intervención tecnológica o arquitectónica, la historia de la vida en la Tierra



**Figura 2.** Representación artística de una fase para habitar lo imposible. La idea de terraformar un planeta parte del principio de que la humanidad imagina este futuro como un camino a la trascendencia, y cómo esta idea se ensaya simbólicamente en el arte, narrativa y tecnología. Siempre con una filosofía de transformar los límites de lo humano, así como convertir el espacio de un lugar hostil a un medio de conexión a un sin fin de posibilidades.

<https://www.aytbuap.mx/aytbuap-1040/portada-1040>

muestra que la habitabilidad de un planeta es, en esencia, un proceso biológico [23, 24]. Los microorganismos como las bacterias fueron los colonizadores primarios del planeta Tierra, apareciendo aproximadamente dos mil millones de años antes que los primeros organismos eucariontes [25]. Su presencia no solo precede a las formas de vida complejas, sino que hizo posible su emergencia y evolución [26, 27].

A través de procesos metabólicos fundamentales, las bacterias transformaron de manera radical un planeta inicialmente hostil a otras formas de vida terrestre [28]. La oxigenación de la atmósfera, la formación de suelos, la movilización de nutrientes y el establecimiento de los principales ciclos biogeoquímicos (carbono, nitrógeno, azufre, fósforo) son consecuencia directa de la actividad microbiana [29]. En este sentido, la Tierra puede entenderse como un planeta

biológicamente terraformado por microorganismos y que siguen sosteniendo la vida del planeta [30].

Desde esta perspectiva, cualquier especulación sobre la terraformación de otros mundos necesariamente debe considerar a las bacterias como agentes iniciales de transformación [8, 31]. No como simples herramientas al servicio de organismos superiores, sino como

arquitectas primarias de condiciones de habitabilidad. Su capacidad de adaptación a ambientes extremos (altas radiaciones, temperaturas extremas, desecación o ausencia de oxígeno) las convierte en candidatas naturales para iniciar la colonización de entornos inhóspitos [31, 32], para acelerar a los procesos biogeoquímicos requeridos para el establecimiento de vida terrestre (Figura 3).



**Figura 3.** Representación conceptual del papel esencial de las bacterias en la terraformación. La ilustración muestra a las bacterias como colonizadoras primarias de un ambiente planetario inhóspito, actuando en la interfase entre el sustrato mineral y la atmósfera. A través de procesos metabólicos asociados a los ciclos biogeoquímicos, las bacterias inician y aceleran la transformación del entorno, posibilitando la generación de condiciones mínimas de habitabilidad. La transición visual desde lo microscópico hacia paisajes emergentes simboliza cómo la actividad microbiana precede y sustenta la aparición de ecosistemas complejos y la eventual presencia humana, destacando que la terraformación es, en esencia, un proceso biológico antes que tecnológico. Imagen generada con la ayuda de ChatGPT y descripción de los autores.

Más aún, puede pensarse que la terraformación no ocurre en solitario, sino mediante consorcios biológicos [33], donde bacterias se acoplan a organismos superiores en relaciones simbióticas que amplían los límites de supervivencia [34, 35]. En este marco, la vida no conquista el entorno de manera violenta, sino que lo transforma gradualmente desde lo microscópico, redefiniendo la frontera entre lo vivo y lo inhabitable.

En el plano simbólico y artístico, las bacterias representan una forma de terraformación silenciosa, invisible pero decisiva. Su inclusión en la narrativa de la terraformación desplaza el protagonismo exclusivo de la tecnología humana y propone una visión donde la trascendencia no surge del control absoluto del entorno, sino de la colaboración entre escalas de vida, desde lo microbiano hasta lo humano (Figura 3).

Así, la terraformación deja de ser únicamente un proyecto futuro y se revela como un proceso que ya ha ocurrido [36, 37]. La Tierra misma es el resultado de una larga historia de adaptación microbiana. Reconocer este hecho implica replantear nuestra imaginación del futuro, donde habitar lo imposible no comienza con grandes estructuras, sino con la aceptación de que la vida, en sus formas más simples, es el verdadero motor de transformación planetaria.

### **Microorganismos y plantas en ambientes desérticos: modelos terrestres de terraformación**

Los ambientes desérticos de la Tierra

constituyen análogos naturales de condiciones planetarias extremas: baja disponibilidad de agua, altas fluctuaciones térmicas, radiación intensa y suelos pobres en nutrientes [38]. En estos contextos, la vida no desaparece, sino que se reorganiza a partir de asociaciones biológicas altamente especializadas, donde microorganismos y plantas establecen relaciones funcionales que permiten la persistencia y expansión de la habitabilidad [39–41].

La introducción deliberada de bacterias acopladas a plantas en ambientes desérticos ha sido propuesta y ensayada como una estrategia para mejorar el establecimiento vegetal, la retención de humedad y la estabilidad del suelo [42]. Estas asociaciones microbio–planta actúan como sistemas integrados capaces de modificar progresivamente el entorno, reduciendo su hostilidad inicial y generando microhábitats donde otros organismos pueden desarrollarse.

Las bacterias asociadas a raíces, rizosfera o tejidos vegetales cumplen funciones clave, como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de minerales, la producción de exopolisacáridos y la modulación de respuestas fisiológicas de las plantas frente al estrés [43–45]. Por su parte, las plantas proporcionan carbono, refugio físico y gradientes químicos que favorecen la persistencia microbiana. Este acoplamiento permite enfrentar condiciones adversas como la desecación, uno de los principales factores limitantes en ecosistemas áridos [46].



Desde una perspectiva de terraformación, estos sistemas pueden entenderse como modelos funcionales a escala terrestre: procesos lentos, cooperativos y acumulativos que transforman un ambiente inhóspito en un espacio progresivamente más habitable [44, 47]. A diferencia de las visiones tecnocéntricas de la terraformación, estos ejemplos enfatizan que la transformación ambiental emerge de la interacción entre organismos y entorno, más que de la imposición externa de condiciones artificiales.

En el plano simbólico y conceptual, las asociaciones bacteria-planta representan una forma de habitar lo imposible basada en la colaboración biológica [33]. No se trata de erradicar en un solo paso la hostilidad del medio, sino de generar islas de habitabilidad desde las cuales la vida puede expandirse. Así, los desiertos terrestres se convierten en laboratorios vivos que anticipan posibles estrategias para la colonización biológica de otros mundos [48].

La ingeniería genética representa una gran oportunidad. Los genes de resistencia a la desecación se han descrito en varias plantas [49]. Por ejemplo, en *Xerophyta viscosa* se han aislado varios genes de resurrección que permiten a las plantas adaptarse a condiciones extremas de desecación (Tabla 1) [50]. Algunos de esos genes de resurrección se han introducido en *Pseudomonas putida* KT2440 [51]; una bacteria biorremediadora de compuestos xenobióticos [52], promotora de crecimiento de plantas y altamente sensible a la desecación [53, 54] y como resultado de esta

introducción de genes se han obtenido bacterias más tolerantes a salinidad y a la desecación [51], y lo más sorprendente es que estas bacterias recombinantes otorgan a las plantas de maíz la capacidad de tolerar la salinidad. Por otro lado, la introducción de genes de tolerancia a la desecación se puede realizar en plantas sensibles con el objetivo de hacerlas tolerantes y así poder adaptarse a ambientes adversos [55, 56]. Un ejemplo, lo constituyen los genes para la síntesis de trehalosa (Tabla 2).

La introducción de bacterias acopladas a plantas en ambientes desérticos, podría significar un ejemplo de cómo transformar un ambiente inhóspito en un sitio agradable donde otros seres vivos pueden desarrollarse [42]. Se podrían seleccionar bacterias y plantas con capacidad de tolerar ambientes adversos como la desecación [50, 57] o bien obtener organismos recombinantes para hacer más efectiva esa adaptación [51, 58].

## CONCLUSIONES

La terraformación, entendida desde el arte y la reflexión cultural, trasciende su definición científica para convertirse en una poderosa metáfora de la condición humana contemporánea. Las representaciones artísticas que abordan este tema no proponen soluciones técnicas, sino escenarios de pensamiento donde se ensayan los límites de lo posible, lo humano y lo habitable.

Habitar lo imposible implica reconocer que la trascendencia no reside únicamente en la conquista de nuevos territorios, sino en la capa-

**Tabla 1.** Genes de *Xerophyta viscosa* relacionados con su tolerancia a la desecación.

Nombre del gen	Función	Referencia
<b>XVSAP1</b> (Proteína que alivia el estrés)	Proteína hidrofóbica relacionada con estabilización de membranas y tolerancia a estrés osmótico, salino, térmico y de desecación.	[59]
<b>XVLEA</b> (Embriogénesis tardía abundante)	Proteína tipo LEA implicada en la protección de macromoléculas durante desecación.	[60]
<b>XVDH / XVT8</b> (Dehidrina)	Proteína hidrofílica implicada en tolerancia a frío y agua deficit; acumulación durante desecación.	[60, 61]
<b>XVPer1</b> (Peroxirredoxina)	Miembro de la superfamilia de metaloenzimas VOC. Actividad antioxidante, asociada a tolerancia a estrés oxidativo y desecación.	[62]
<b>XvAld1</b> (Aldosa reductasa)	Enzima antioxidante que contribuye a la tolerancia a estrés oxidativo y desecación; mejora características fisiológicas bajo sequía en transgénicos.	[63]
<b>XvGolS</b> (Galactinol sintasa)	Primera etapa en biosíntesis de oligosacáridos protectores durante desecación (RFOs).	[64]
<b>XvPrx2</b> (Peroxirredoxina tipo II)	Proteína antioxidante que protege contra daño oxidativo y podría jugar papel en estabilidad redox bajo desecación.	[65, 66]

**Tabla 2.** Ejemplos de plantas donde se han clonado genes de biosíntesis de trehalosa y su efecto observado.

Organismo receptor	Genes de trehalosa introducidos	Resultado observado (tolerancia/fenotipo)	Referencia
Crisantemo ( <i>Chrysanthemum</i> sp.)	<i>TPS1</i> y <i>TPS2</i> (de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> )	Incremento en tolerancia a sequía, deshidratación foliar y prolongación de vida post-cosecha; mayor resistencia a estrés biótico	[67]
Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	Genes de biosíntesis de trehalosa ( <i>TPS/TPP</i> de <i>Agrobacterium tumefaciens</i> )	Plantas tolerantes a sequía, frío y patógenos en transformaciones experimentales	[68]
Cultivos diversos (maíz, papa, etc.) (general)	<i>TPS</i> y <i>TPP</i> (de <i>E. coli</i> )	Mayor tolerancia a estrés por sequía y salinidad con sobreexpresión de genes de ruta de trehalosa	[58]
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	<i>ScTPS1-TPS2</i> (de <i>S. cerevisiae</i> )	Tolerancia aumentada a salinidad, mejor eficiencia de uso de agua y fijación de CO <sub>2</sub>	[69]
Tabaco ( <i>Nicotiana tabacum</i> )	<i>TPS1</i> de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Tolerancia a estrés hídrico y salino (menor pérdida de agua y protección osmótica)	[70]

cidad de imaginar y aceptar la transformación constante. En este sentido, el arte, la narrativa y la tecnología convergen como espacios donde la humanidad explora no solo otros mundos, sino nuevas maneras de existir en ellos.

La terraformación, observada desde una perspectiva interdisciplinaria, deja de ser

exclusivamente una aspiración futurista para convertirse en un proceso que ya ha ocurrido en la historia de la Tierra. La actividad microbiana transformó un planeta inicialmente hostil en un sistema complejo y dinámico capaz de sostener vida, demostrando que la habitabilidad es, ante todo, un fenómeno biológico.

El reconocimiento del papel central de las bacterias como agentes primarios de transformación ambiental acelerada desplaza el protagonismo exclusivo de la tecnología humana y abre la posibilidad de pensar la terraformación como un proceso cooperativo, en fases y acumulativo. En este marco, las asociaciones entre microorganismos y plantas en ambientes desérticos ofrecen ejemplos tangibles de cómo la vida puede expandirse bajo condiciones extremas, generando islas de habitabilidad que permiten la incorporación progresiva de otros organismos.

Desde el arte y la reflexión filosófica, estas dinámicas biológicas enriquecen la metáfora de habitar lo imposible, al mostrar que la trascendencia no implica la imposición de un modelo único de vida, sino la capacidad de adaptarse, transformarse y coexistir con entornos radicalmente distintos. Así, la terraformación se redefine no como la reproducción de la Tierra en otros mundos, sino como la creación de nuevas formas de relación entre vida, espacio y posibilidad, donde lo microbiano, lo vegetal y lo humano participan en un mismo continuo de transformación.

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no tienen ningún conflicto de intereses con el contenido de este manuscrito.

### AGRADECIMIENTOS

A la VIEP-BUAP por el apoyo para llevar a cabo nuestras investigaciones. También

agradecemos a la Dirección Internacionalización de la Investigación de la BUAP, quienes amablemente nos apoyan para que el conocimiento rebase las fronteras nacionales. Yolanda Elizabeth Morales-garcía, Jesús Muñoz-Rojas y María del Rocío Bustillos Cristales pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras por lo que agradece a la SECIHTI por el apoyo otorgado.

### REFERENCIAS

- [1]. Fogg MJ. Terraforming: a review for environmentalists. *Environmentalist*. 1993;13(1):7–17. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF01905499>
- [2]. Pak C. Planetary Climates: Terraforming in Science Fiction. In: Johns-Putra A, editor. *Climate and Literature*. Cambridge: Cambridge University Press; 2019. p. 196–211. (Cambridge Critical Concepts). Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/product/C04496E7FFD5E68A377CA02C3DEC9BFF>
- [3]. Çelekli A, Zariç ÖE. Breathing life into Mars: Terraforming and the pivotal role of algae in atmospheric genesis. *Life Sci Sp Res*. 2024;41:181–90. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214552424000282>
- [4]. DeBenedictis EA, Kite ES, Wordsworth RD, Lanza NL, Cockell CS, Silver PA, *et al.* The case for Mars terraforming research. *Nat Astron*. 2025;9(5):634–9. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41550-025-02548-0>
- [5]. Beech M. The Terraforming of Mars. In:



Beech M, editor. Terraforming: The Creating of Habitable Worlds. New York, NY: Springer New York; 2009. p. 125–73. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-09796-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09796-1_6)

[6]. Heise UK. Terraforming for Urbanists. *Novel*. 2016 May 1;49(1):10–25. Disponible en: <https://doi.org/10.1215/00295132-3458181>

[7]. Bruyere V. Terraformings. *Imaginations*. 2019;10(2):36–64. Disponible en: <https://id.erudit.org/iderudit/1068514ar>

[8]. Williams MS. A guide to classical terraforming. In: Johnson L, Roy KBT-IT, editors. *Interstellar Travel After Arrival*. Elsevier; 2026. p. 125–44. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032391637000007X>

[9]. Joseph SR, Koudur S. Reimagining the Lagosian Landscape in Lagoon: Extraterrestrials, Geoengineering, and a More-than-Human Ecology. *Scrutiny2*. 2025 May 4;29(2):24–42. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/18125441.2025.2458549>

[10]. Pak Chris. Ecocriticism and Terraforming: Building Critical Spaces. *FORUM Univ Edinburgh Postgrad J Cult Arts*. 2010 Jun 5;(10 SE-Articles):1–14. Disponible en: <https://doi.org/10.2218/forum.10.644>

[11]. Sparrow R. The Ethics of Terraforming. *Environ Ethics*. 1999 Dec 28;21(3):227–45. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/48843114>

[12]. Persinger K. *Constructing Reality: An Investigation of Climate Change and the*

*Terraforming Imaginary*. Macksey J. 2020;1(1):103. Disponible en: [https://scholar.google.com/scholar?cites=7191629198589429838&as\\_sdt=2005&scioldt=0.5&hl=es](https://scholar.google.com/scholar?cites=7191629198589429838&as_sdt=2005&scioldt=0.5&hl=es)

[13]. Schwarz M. From Colonial Terraforming towards a Planet-Based Solidarity: Indigenous Speculations between Planet Earth and Outer Space. *Orbit A J Am Lit*. 2025;12(1):1–20. Disponible en: <https://orbit.openlibhums.org/article/id/16875/>

[14]. Pak C. Terraforming and the City. *Fantast Cities Am Urban Spaces Sci Fict Fantasy, Horror*. 2022;229–44. Disponible en: <https://academic.oup.com/mississippi-scholarship-online/book/44241/chapter-abstract/372532780>

[15]. Klosterwill KJ. Metaphors We Scape By: the Possibilities of Terraforming As a New Descriptor of Landscape. *Landsc Res Rec*. 2018;(7):83–94. Disponible en: <https://thecela.me/wp-content/uploads/372F-METAPHORS-WE-SCAPE-BY.pdf>

[16]. Cheney T. Universe Exploration and Colonization. In: Failat YA, Ferreira-Snyman A, editors. *Outer Space Law: Legal Policy and Practice*, 2nd edition. Globe Law and Practice; 2022. p. 161–74. Disponible en: <https://oro.open.ac.uk/81802/1/Chapter%2013.3.21.pdf>

[17]. Michaels C. *Terraforming Modernism*. ProQuest Dissertations and Theses. [United States -- Florida]: The Florida State University PP - United States -- Florida; 2020. Disponible en: <https://www.proquest.com/dissertations->

[theses/terraforming-modernism/docview/2459447788/se-2?accountid=134081](https://theses.terraforming-modernism/docview/2459447788/se-2?accountid=134081)

[18]. Solé R V, Montañez R, Duran-Nebreda S. Synthetic circuit designs for earth terraformation. *Biol Direct*. 2015;10(1):37. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13062-015-0064-7>

[19]. Stoner I. The Ethics of Terraforming: A Critical Survey of Six Arguments. In: *Terraforming Mars*. 2021. p. 99–115. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/9781119761990.ch6>

[20]. Forde V. Astrophysical Preservation of Terrestrial Life on Mars Through a Sphericalist, Esoteric Futurist Approach. PQDT - Global. [England]: Liverpool John Moores University (United Kingdom) PP - England; 2024. Disponible en: <https://www.proquest.com/dissertations-theses/astrophysical-preservation-terrestrial-life-on/docview/3161892642/se-2?accountid=134081>

[21]. Darnov D. A Machine for Making Planets: Environmental Media in the Anthropocene. ProQuest Dissertations and Theses. [United States -- Wisconsin]: The University of Wisconsin - Madison PP - United States -- Wisconsin; 2025. Disponible en: <https://www.proquest.com/dissertations-theses/machine-making-planets-environmental-media/docview/3217086035/se-2?accountid=134081>

[22]. Giorgio Gaviraghi. Terraforming Mars: A

Strategic Framework for Sustainable Colonization and Expansion. *Acceleron Aerosp J*. 2025 Mar 30;4(3 SE-Articles):962–90. Disponible en: <https://www.acceleron.org.in/index.php/aa/article/view/224>

[23]. Cockell CS, Bush T, Bryce C, Direito S, Fox-Powell M, Harrison JP, *et al*. Habitability: A Review. *Astrobiology*. 2016 Jan 1;16(1):89–117. Disponible en: <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1295>

[24]. Lineweaver CH, Chopra A. The Habitability of Our Earth and Other Earths: Astrophysical, Geochemical, Geophysical, and Biological Limits on Planet Habitability. *Annu Rev Earth Planet Sci*. 2012;40(Volume 40, 2012):597–623. Disponible en: <https://www.annualreviews.org/content/journal/s/10.1146/annurev-earth-042711-105531>

[25]. Beraldi Campesi H. La vida temprana en la Tierra y los primeros ecosistemas terrestres. *Boletín la Soc Geológica Mex*. 2014;66(1):65–83. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222014000100007](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222014000100007)

[26]. Zilber-Rosenberg I, Rosenberg E. Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution. *FEMS Microbiol Rev*. 2008 Aug 1;32(5):723–35. Disponible en: <https://academic.oup.com/femsre/article/32/5/723/2398937>

[27]. Richardson DJ. Bacterial respiration: a flexible process for a changing environment 1999 Fleming Lecture (Delivered



at the 144th meeting of the Society for General Microbiology, 8 September 1999). Microbiology. 2000;146(3):551–71. Disponible en:

<https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/00221287-146-3-551>

[28]. Lopez JV, Peixoto RS, Rosado AS. Inevitable future: space colonization beyond Earth with microbes first. FEMS Microbiol Ecol. 2019 Oct 1;95(10):fiz127. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiz127>

[29]. Maier RM. Biogeochemical Cycling. In: Pepper IL, Gerba CP, Gentry TJB-T-EM (Third E, editors. Environmental Microbiology (Third edition). San Diego: Academic Press; 2015. p. 339–73. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123946263000168>

[30]. Morales-García Y-E, Duque E, Rodríguez-Andrade O, de la Torre J, Martínez-Contreras R-D, Pérez R, *et al.* Bacterias Preservadas, una Fuente Importante de Recursos Biotecnológicos. Bio Tecnol. 2010;14(2):11–29. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/235901617\\_Bacterias\\_Preservadas\\_una\\_Fuente\\_Importante\\_de\\_Recursos\\_Biotecnologicos](https://www.researchgate.net/publication/235901617_Bacterias_Preservadas_una_Fuente_Importante_de_Recursos_Biotecnologicos)

[31]. Coleine C, Delgado-Baquerizo M, Rosado AS, Zerboni A. The role of extremophile microbiomes in terraforming Mars. Commun Biol. 2025;8(1):1588. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s42003-025-08973-1>

[32]. Keaney D, Lucey B, Finn K. A Review of Environmental Challenges Facing Martian Colonisation and the Potential for Terrestrial

Microbes to Transform a Toxic Extraterrestrial Environment. Challenges. 2024; 15(1): 5. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2078-1547/15/1/5>

[33]. Conde-Pueyo N, Vidiella B, Sardanyés J, Berdugo M, Maestre FT, de Lorenzo V, *et al.* Synthetic Biology for Terraformation Lessons from Mars, Earth, and the Microbiome. Life. 2020; 10(2): 14. <https://www.mdpi.com/2075-1729/10/2/14>

[34]. Morales-García YE, Baez A, Quintero-Hernández V, Molina-Romero D, Rivera-Urbalejo AP, Pazos-Rojas LA, *et al.* Bacterial mixtures, the future generation of inoculants for sustainable crop production. In: Maheshwari DK, Dheeman S, editors. Field Crops: Sustainable Management by PGPR. Cham: Springer International Publishing; 2019. p. 11–44. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-30926-8\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-30926-8_2)

[35]. Molina-Romero D, Baez A, Quintero-Hernández V, Castañeda-Lucio M, Fuentes-Ramírez LE, Bustillos-Cristales M del R, *et al.* Compatible bacterial mixture, tolerant to desiccation, improves maize plant growth. PLoS One. 2017 Nov 8;12(11):e0187913. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0187913>

[36]. Dobrovol'skaya TG, Zvyagintsev DG, Chernov IY, Golovchenko A V, Zenova GM, Lysak L V, *et al.* The Role of Microorganisms in the Ecological Functions of Soils. Eurasian Soil Sci. 2015;48:959. Disponible en:

<https://link.gale.com/apps/doc/A721207739/AONE?u=anon~72c0b781&amp>

[37]. Buscot F, Varma A. VA. Microorganisms in soils: roles in genesis and functions. F. Buscot AV, editor. Microorganisms in soils: roles in genesis and functions. Springer-Verlag 419 pp. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/b137872>

[38]. Azua-Bustos A, González-Silva C, Fairén AG. The Atacama Desert in Northern Chile as an Analog Model of Mars. *Front Astron Sp Sci*. 2022; 8: fspas.2021.810426. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2021.810426>

[39]. Cockell CS. Are microorganisms everywhere they can be? *Environ Microbiol*. 2021 Nov 1;23(11):6355–63. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15825>

[40]. Westall F, Loizeau D, Foucher F, Bost N, Bertrand M, Vago J, *et al.* Habitability on Mars from a Microbial Point of View. *Astrobiology*. 2013 Sep 1;13(9):887–97. Disponible en: <https://doi.org/10.1089/ast.2013.1000>

[41]. Kapoor DD, Yadav S, Gupta RK. Microbial Life and Adaptation on Land, Underwater, and Other Planets for Sustainable Development. In: Sobti RC, editor. *Biotechnology Innovations for a Sustainable Future: Integrating Clean Energy, Life on the Planet, Clean Water, and Climate Action*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2026. p. 431–67. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-981-97-9859-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-97-9859-9_21)

[42]. Alsharif W, Saad MM, Hirt H. Desert Microbes for Boosting Sustainable Agriculture in Extreme Environments. *Front Microbiol*. 2020; 11: fmicb.2020.01666. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2020.01666>

[43]. Molina-Romero D, Bustillos-Cristales M del R, Rodríguez-Andrade O, Morales-García YE, Santiago-Saenz Y, Castañeda-Lucio M, *et al.* Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas*. 2015;17(2):24–34. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Munoz-Rojas/publication/293086504\\_Mecanismos\\_de\\_fitoestimulacion\\_por\\_rizobacterias\\_aislamientos\\_en\\_America\\_y\\_potencial\\_biotecnologico](https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Munoz-Rojas/publication/293086504_Mecanismos_de_fitoestimulacion_por_rizobacterias_aislamientos_en_America_y_potencial_biotecnologico)

[44]. Khan N, Ali S, Tariq H, Latif S, Yasmin H, Mehmood A, *et al.* Water Conservation and Plant Survival Strategies of Rhizobacteria under Drought Stress. *Agronomy*. 2020; 10(11): 1683. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/11/1683>

[45]. Baez-Rogelio A, Morales-García YE, Quintero-Hernández V, Muñoz-Rojas J. Next generation of microbial inoculants for agriculture and bioremediation. *Microb Biotechnol*. 2017;10(1):19–21. Disponible en: <https://enviromicro-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1751-7915.12448>

[46]. Soussi A, Ferjani R, Marasco R, Guesmi A, Cherif H, Rolli E, *et al.* Plant-associated microbiomes in arid lands: diversity, ecology



and biotechnological potential. *Plant Soil*. 2016;405(1):357–70. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2650-y>

[47]. Ruiz-Hernandez IH, Madrigal-Perez LA, González-Hernández JC. The potential use of *Pseudomonas* in terrestrial and space agriculture. *Brazilian J Biol*. 2024;84:1–12. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/8J9sR3mvS3J7xxkRLBrhdCQ/?lang=en>

[48]. Rossoukh RD. Colonizing Mars in the Arabian Desert. *Int J Middle East Stud*. 2025/08/22. 2025;57(1):152–64. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/journals/international-journal-of-middle-east-studies/article/colonizing-mars-in-the-arabian-desert/A319A64CBA4BA3058BB443457314C6FD>

[49]. Ramanjulu S, Bartels D. Drought- and desiccation-induced modulation of gene expression in plants. *Plant Cell Environ*. 2002 Feb 1;25(2):141–51. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.0016-8025.2001.00764.x?msockid=2fa08a48afb36a8f2b698477ae916bb5>

[50]. Farrant JM, Cooper K, Hilgart A, Abdalla KO, Bentley J, Thomson JA, *et al.* A molecular physiological review of vegetative desiccation tolerance in the resurrection plant *Xerophyta viscosa* (Baker). *Planta*. 2015;242(2):407–26. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00425-015-2320-6>

[51]. Ramos Martin JL, Muñoz-Rojas J. Microorganismos recombinantes que contienen un gen de resistencia a estrés salino y sus aplicaciones. Spain: ES 2 307 391 A1; 200602012, 2006. p. 1–31. Disponible en <https://patents.google.com/patent/ES2307391A1/es>

[52]. Fan M, Tan S, Wang W, Zhang X. Improvement in Salt Tolerance Ability of *Pseudomonas putida* KT2440. *Biology*. 2024; 13(6): 404. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-7737/13/6/404>

[53]. Vázquez-Martínez LE, Muñoz-Rojas J. *Pseudomonas putida* KT2440, como una potencial bacteria promotora del crecimiento en cultivos agrícolas. *Alianzas y Tendencias BUAP*. 2023;8(31):80–94. Disponible en: <https://www.aytbuap.mx/aytbuap-831/pseudomonas-putida-kt2440-como-una-potencial-bacteria-promotora>

[54]. Alonso Torres E, Panecatl Bernal Y, Alvarado-Pulido JJ, Fuentes-Ramírez LE, Martínez-Morales J, Muñoz-Rojas J, *et al.* Rumbo a la generación de inoculantes en polvo a base de *Pseudomonas putida* KT2440. *Alianzas y Tendencias BUAP*. 2022;7(27):87–116. Disponible en: <https://www.aytbuap.mx/aytbuap-727/rumbo-a-la-generaci%C3%B3n-de-inoculantes-en-polvo-a-base-de-pseudomonas-putida>

[55]. Rodríguez-Salazar J, Suárez R, Iturriaga G, Caballero-Mellado J. Trehalose accumulation in *Azospirillum brasilense* improves drought tolerance and biomass in maize plants. *FEMS Microbiol Lett*.

2009;296(1):52–9. Disponible en:  
[https://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo\\_thumb/Trehalose-accumulation-in-Azospirillum-brasilense-improves-drought-tolerance-and-biomass-inmaize-plants.pdf](https://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/Trehalose-accumulation-in-Azospirillum-brasilense-improves-drought-tolerance-and-biomass-inmaize-plants.pdf)

[56]. Shumayla, Alejo-Jacuinde G, Silva-Villatoro P, Nwoko CL, Oliver MJ, Herrera-Estrella L. The promise of resurrection plants in enhancing crop tolerance to water scarcity. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 2025 May 29;380(1927):20240231. Disponible en:  
<https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/380/1927/20240231/234979/The-promise-of-resurrection-plants-in-enhancing>

[57]. Pazos-Rojas LA, Rodríguez-Andrade O, Muñoz-Arenas LC, Morales-García YE, Corral-Lugo A, Quintero-Hernández V, *et al.* Desiccation-tolerant rhizobacteria maintain their plant growth-promoting capability after experiencing extreme water stress. *SciFed J Appl Microbiol.* 2018;2(1):1–13. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/325094145\\_Desiccation-Tolerant Rhizobacteria Maintain their Plant GrowthPromoting Capability after Experiencing Extreme Water Stress](https://www.researchgate.net/publication/325094145_Desiccation-Tolerant_Rhizobacteria_Maintain_their_Plant_GrowthPromoting_Capability_after_Experiencing_Extreme_Water_Stress)

[58]. Carvajal-Campos P, Jiménez VM. Ingeniería genética contra estrés abiótico en cultivos neotropicales: osmolitos, factores de transcripción y CRISPR/Cas9. *Rev Colomb Biotecnol.* 2021;23(2):47–66. Disponible en:  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-34752021000200047](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752021000200047)

[59]. Garwe D, Thomson JA, Mundree SG.

XVSAP1 from *Xerophyta viscosa* improves osmotic-, salinity- and high-temperature-stress tolerance in *Arabidopsis*. *Biotechnol J.* 2006 Oct 1;1(10):1137–46. Disponible en:  
<https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/biot.200600136>

[60]. Ndima TB. Gene expression associated with drought tolerance in *Xerophyta viscosa* Baker. University of Cape Town; 2000. Disponible en:  
<http://hdl.handle.net/11427/4309>

61. Ndima T, Farrant J, Thomson J, Mundree S. Molecular characterization of XVT8, a stress-responsive gene from the resurrection plant *Xerophyta viscosa* Baker. *Plant Growth Regul.* 2001;35(2):137–45. Disponible en:  
<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1014433821730>

[62]. Mowla SB, Thomson JA, Farrant JM, Mundree SG. A novel stress-inducible antioxidant enzyme identified from the resurrection plant *Xerophyta viscosa* Baker. *Planta.* 2002;215(5):716–26. Disponible en:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00425-002-0819-0>

[63]. Mbinda W, Ombori O, Dixelius C, Oduor R. *Xerophyta viscosa* Aldose Reductase, XvAld1, Enhances Drought Tolerance in Transgenic Sweetpotato. *Mol Biotechnol.* 2018;60(3):203–14. Disponible en:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12033-018-0063-x>

[64]. Neumann AJ. Characterisation of galactinol synthase II (XvGolSII) from the resurrection plant *Xerophyta viscosa* (Baker).

University of Cape Town; 2013. Disponible en:  
<http://hdl.handle.net/11427/6623>

[65]. Govender K. Characterisation of XvPrx2: a type II peroxiredoxin isolated from the resurrection plant *Xerophyta viscosa* (Baker). University of Cape Town; 2006. Disponible en:  
<http://hdl.handle.net/11427/4268>

[66]. Govender K, Thomson JA, Mundree S, ElSayed AI, Rafudeen MS. Molecular and biochemical characterisation of a novel type II peroxiredoxin (XvPrx2) from the resurrection plant *Xerophyta viscosa*. *Funct Plant Biol.* 2016 Jan 12;43(7):669–83. Disponible en:  
<https://doi.org/10.1071/FP15291>

[67]. Cuellar Olalde R. Plantas transgénicas de crisantemo que acumulan trehalosa muestran tolerancia a estrés biótico y abiótico. Universidad Autónoma de Chapingo; 2015. Disponible en:  
<https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/df274cce-7247-40d5-b5f1-2ce1b8fe4380>

[68]. Romero Escobedo SY. Transformación

genética de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) con genes de biosíntesis de trehalosa. Universidad Autónoma de Chapingo; 2017. Disponible en:  
<https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/96396ad8-0e67-4fa0-9d86-052f83ca8af1>

[69]. Cabral Torres FA. Respuesta fenotípica de plantas de trigo transformadas con el gen *sctps1-tps2* para síntesis de trehalosa. 2014. Disponible en:  
<https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/279/1/CABRAL-TORRES-FA14.pdf>

[70]. Romero Salvador C. Tolerancia a los estreses salino e hídrico y metabolismo de carbohidratos en plantas de tabaco transgénico que expresan el gen *tps1* de levadura. Universitat Politècnica de València; 1999. Disponible en:  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=245351>