

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Flora vascular altoandina del Perú y su potencial uso en ecosíntesis planetaria

Michael S. Vega Chávez^{1,2}

<https://orcid.org/0000-0003-2091-6000>

¹Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

²Sociedad Científica de Astrobiología del Perú (SCAP), Lima, Perú.

Email: 0800michael@gmail.com

Recibido: 29/09/2024 • Revisado: 24/10/2024 • Aceptado: 15/01/2025

Resumen

El presente artículo muestra ejemplos de algunas plantas que forman parte de las comunidades vegetales de las zonas altoandinas del Perú, que debido a sus adaptaciones ecológicas y sus mecanismos reproductivos, no sólo son capaces de sobrevivir y perpetuarse en este ecosistema tan hostil, sino que además, muy posiblemente dichas plantas estarían entre los primeros organismos vegetales superiores o plantas vasculares (que poseen xilema y floema) que podrían ser enviadas a planetas como Marte para su eventual ecosíntesis (“terraformación”).

Palabras clave: Flora altoandina, adaptaciones ecológicas, ecosíntesis planetaria, terraformación.

Citar como:

Vega Chávez, M. S. (2025). Flora altoandina, adaptaciones ecológicas, ecosíntesis planetaria, terraformación. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(1), 1–23.

<https://doi.org/10.69976/aspast.v2n1.1>

RESEARCH ARTICLE

High Andean vascular flora of Peru and its potential use in planetary ecosynthesis

Michael S. Vega Chávez^{1,2}

<https://orcid.org/0000-0003-2091-6000>

¹Jardín Botánico Octavio Velarde Núñez, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

²Sociedad Científica de Astrobiología del Perú (SCAP), Lima, Perú.

Email: 0800michael@gmail.com

Recibido: 29/09/2024 • Revisado: 24/10/2024 • Aceptado: 15/01/2025

Abstract

This article shows examples of some plants that are part of the plant communities of the high Andean areas of Peru, which due to their ecological adaptations and reproductive mechanisms, are not only capable of surviving and perpetuating themselves in this hostile ecosystem, but also, very possibly, said plants would be among the first higher plant organisms or vascular plants (which have xylem and phloem) that could be sent to planets like Mars for eventual ecosynthesis ("terraforming").

Keywords: High Andean flora, ecological adaptations, planetary ecosynthesis, terraforming.

Cite as:

Vega Chávez, M. S. (2025). Flora altoandina, adaptaciones ecológicas, ecosíntesis planetaria, terraformación. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(1), 1–23.

<https://doi.org/10.69976/aspast.v2n1.1>

Introducción

Cuando se piensa en la terraformación de otros planetas, como por ejemplo Marte, los primeros organismos que nos vienen a la mente para enviar a colonizar dichos planetas son las cianobacterias y otros microorganismos extremófilos, y es que dadas las duras condiciones ambientales que existen fuera de nuestro planeta Tierra, estos organismos son los que estarían mejor adaptados para sobrevivir y reproducirse bajo dichas condiciones extremas. Sin embargo, dado que la finalidad del proceso de terraformación, o ecosíntesis planetaria, es obtener, en otro planeta fuera de la Tierra, un medio ambiente habitable para los seres humanos (Molina 2018), será indispensable conseguir que las plantas vasculares también puedan crecer fuera del planeta Tierra y formar ecosistemas sostenibles y funcionales.

Las plantas vasculares comprenden a los helechos y afines (antiguamente conocidas como “Pteridophytas”), las gimnospermas o “coníferas”, y las angiospermas o “plantas con flores”. Todos estos grupos comparten en común, además de poseer haces vasculares (xilema y floema), que también son los principales elementos que componen la diversidad y la estructura de las comunidades vegetales en los ecosistemas terrestres (Margalef 1993). La gran mayoría de las especies vegetales que el ser humano utiliza en su alimentación, obtención de materias primas, y/o para su simple confort, también son plantas vasculares (Font Quer 1978). De allí la importancia de que, si la especie humana decide colonizar otros planetas, las plantas vasculares también puedan crecer en estos “nuevos mundos”.

Muy posiblemente Marte será el primer, planeta después de la Tierra, que la especie humana conseguirá habitar, y es por eso que la mayor parte de la bibliografía que habla acerca del tema de terraformación y ecosíntesis planetaria se centra en ese planeta. Entonces, ¿cuáles serían las primeras plantas vasculares que podrían crecer en Marte? El planeta Marte en la actualidad es un desierto congelado con baja presión atmosférica, temperaturas por debajo de cero, y altos niveles de radiación (McKay & Maninova 2001, Graham 2004, McKay 2009), condiciones ambientales tan hostiles hacen casi imposible que la mayoría de especies vegetales con las que los humanos convivimos en nuestro día a día puedan crecer y desarrollarse. Sin embargo, aquí mismo en la Tierra encontramos condiciones ambientales muy similares a las de Marte en los ecosistemas de alta montaña (Molina et al. 2014, Molina 2018), y pese a ello, estos ecosistemas poseen una amplia biodiversidad vegetal poco estudiada y aprovechada, en especial en países andinos como el Perú (Weberbauer 1945, Brako & Zarucchi 1993, Ulloa et al. 2004, Van der Werff & Consiglio 2004, Sklenář et al. 2005, Cano et al. 2005, 2006, 2010, 2011).

“Bajando por la montaña”

Graham (2003, 2004, 2006) ha planteado cuál sería la sucesión ecológica que se daría en Marte en el caso de una eventual terraformación de ese planeta, y la comparó a la sucesión ecológica que se observa al ir desplazándose desde los hielos polares hacia latitudes con clima más templado, o bajando desde la cima nevada de una montaña hacia altitudes medias con clima más cálido. Tomando el ejemplo de la montaña (Figura 1), en su cima nevada o “zona nival”, los únicos organismos que pueden sobrevivir y formar comunidades bióticas residentes son los microorganismos; mientras que al bajar hacia las zonas descubiertas de hielo, también denominadas zonas periglaciales (MINAM 2015, 2018), aparecen las primeras formas de vida macroscópicas, siendo evidente la presencia de plantas no vasculares, tales como los líquenes (organismos formados por la unión simbiótica de un hongo y un alga) y los briófitos (musgos, hepáticas, y antocerotas). Estas mismas comunidades

bióticas son las que podrían establecerse a lo largo de las diferentes etapas de la terraformación de Marte, una vez consigamos aumentar la temperatura y la presión atmosférica del planeta para mejorar sus condiciones de habitabilidad (Pazar 2018).

Figura 1



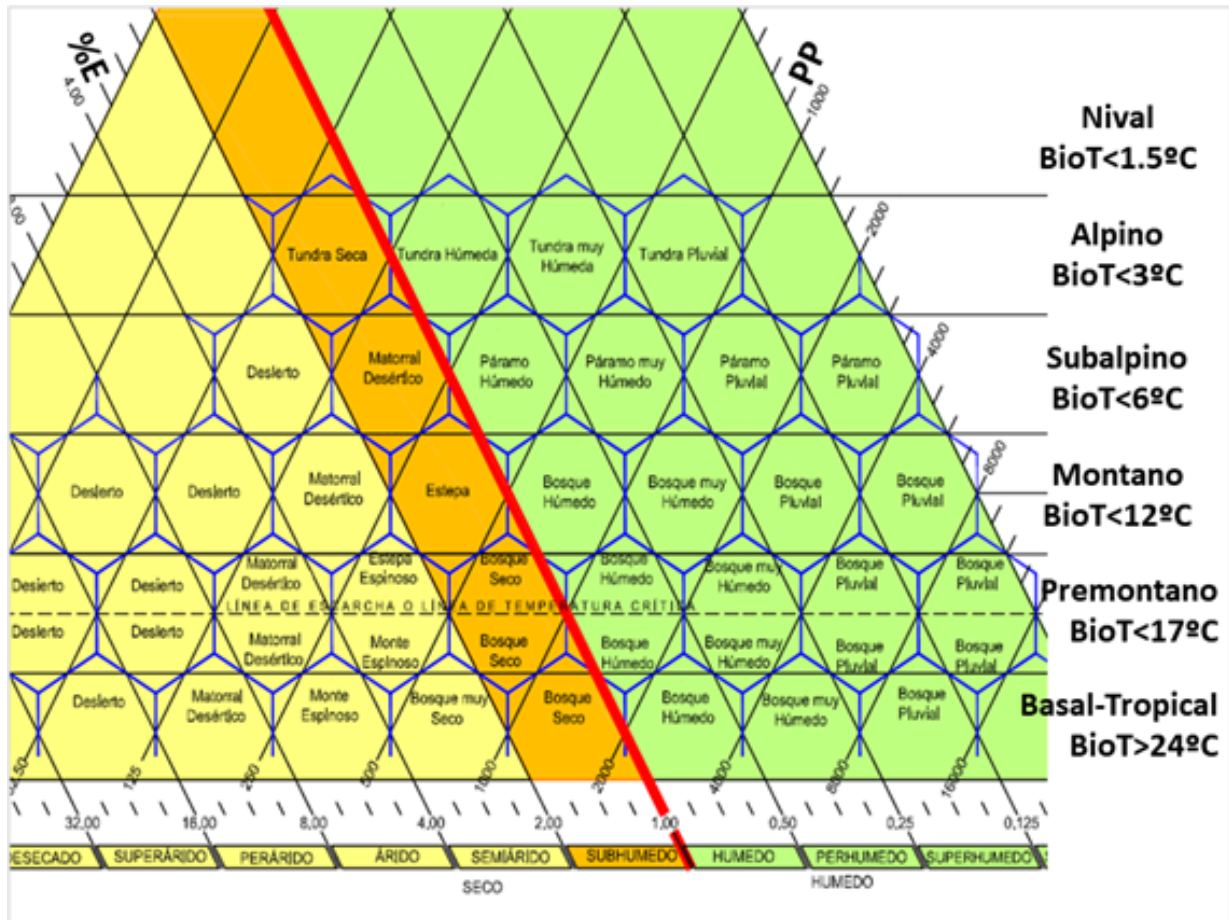
Nota. Vista de la Cordillera Blanca (departamento de Ancash), mostrando los diferentes tipos de ecosistemas que pueden encontrarse al ir “bajando por la montaña” desde su cima: 1). Zona nival, similar al Marte actual, sin vida aparente, salvo por algunos microorganismos capaces de sobrevivir al frío y otras condiciones extremas de esta; 2). Zona periglacial, en dónde aparecen las primeras comunidades de plantas no vasculares como líquenes y briófitos, tal y como Graham (2003, 2004, 2006) afirma que ocurriría en las primeras etapas de la terraformación de Marte; 3). Tundras, en dónde las condiciones ambientales permiten la formación de las primeras comunidades vegetales con plantas vasculares; 4). Ecosistema templado, en dónde se puede apreciar la aparición de comunidades vegetales más complejas y diversas, tales como las estepas (“pajonales”), matorrales, y bosques, equivalentes a lo que se esperaría encontrar en las etapas finales de la terraformación de Marte.

Continuando con el descenso por la montaña (Figura 1), encontramos las primeras comunidades vegetales con plantas vasculares, en dónde las condiciones ambientales permiten el ensamblaje de ecosistemas más complejos. El primero de estos ecosistemas, según el sistema ecológico de zonas de vida de Holdridge (Camacho & Lavado-Casimiro 2017) (Figura 2), es la Tundra (ver Figura 3), palabra que en ruso significa “tierra sin árboles”,

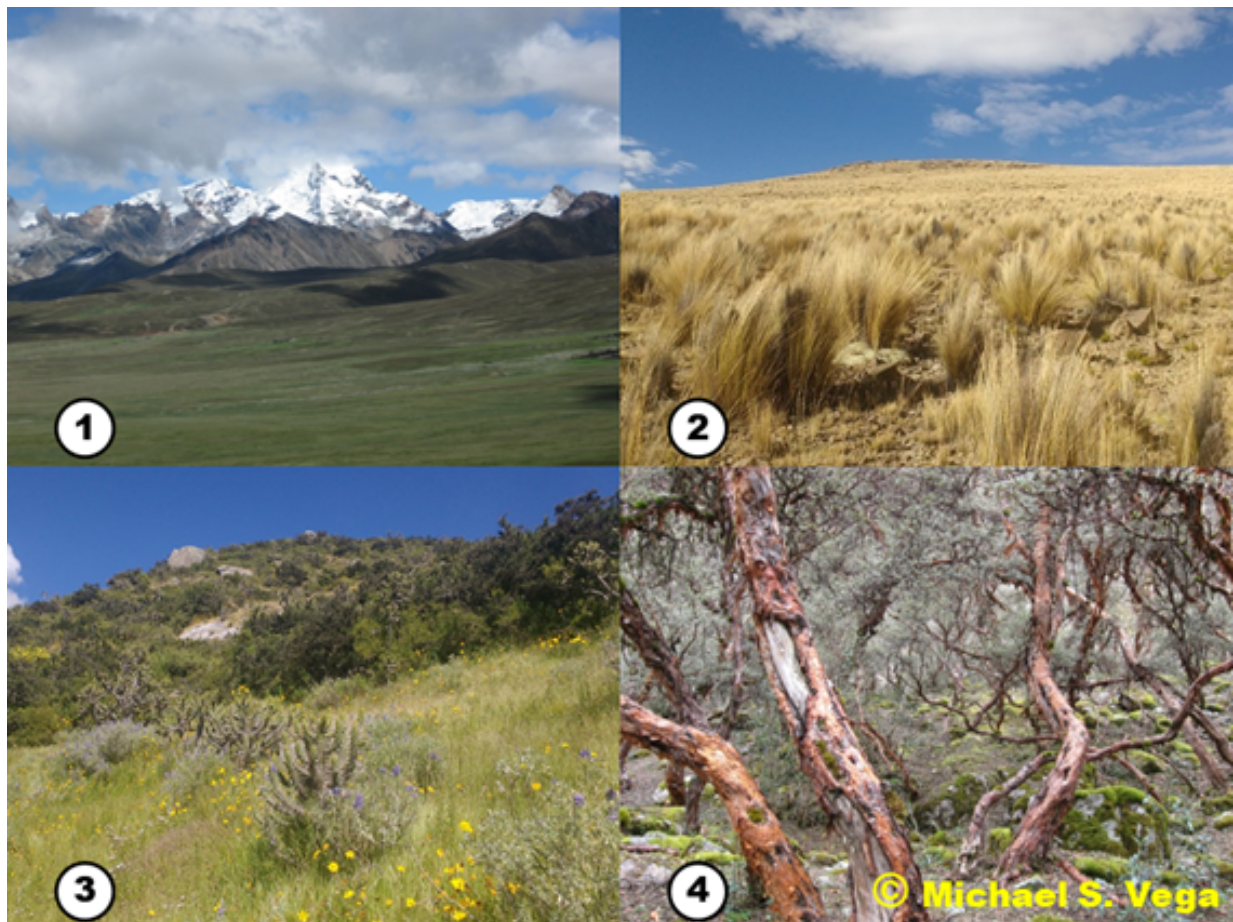
ya que aquí sólo pueden crecer hierbas cespitosas (“en forma de césped”) pegadas al suelo para protegerse mejor del viento congelado y las bajas temperaturas que aún prevalecen en estas zonas. Otra característica de la Tundra es la presencia de un permafrost, es decir una capa de hielo bajo su suelo, el cual presenta una dinámica cíclica de congelamiento y descongelamiento producto de la diferencia de temperatura entre el día y la noche, lo que provoca el desplazamiento de materiales y nutrientes entre las distintas capas u horizontes del suelo. A esto se le suele llamar suelo crioturbado, y le confiere a las comunidades vegetales que crecen sobre los suelos de la Tundra características particulares en lo que respecta a su diversidad, estructura, fisiología y ecología (Peterson et al. 2003, Cano et al. 2010, 2011).

Finalmente, en las partes más bajas y cálidas de la montaña encontramos a los ecosistemas templados, y en dónde se tiene a las comunidades vegetales más complejas y diversas (ver Figura 3). En primer lugar, tenemos a las Estepas, también llamadas “Pajonales” aquí en Perú, y cuyo nombre hace referencia a las gramíneas (familia Poaceae) del género *Stipa* y demás géneros relacionados (como por ejemplo el género *Jarava*, nativo de los andes peruanos), debido a que son estas plantas el elemento más abundante y característico de estas comunidades vegetales. Junto a las Estepas se tienen además a las comunidades de plantas leñosas como lo son los Matorrales, y Bosques altoandinos. Según Graham (2003, 2004, 2006) y Molina (2018), estas mismas comunidades vegetales podrían también ensamblarse en Marte en las etapas más avanzadas y finales de su proceso de terraformación (Figura 4).

Figura 2

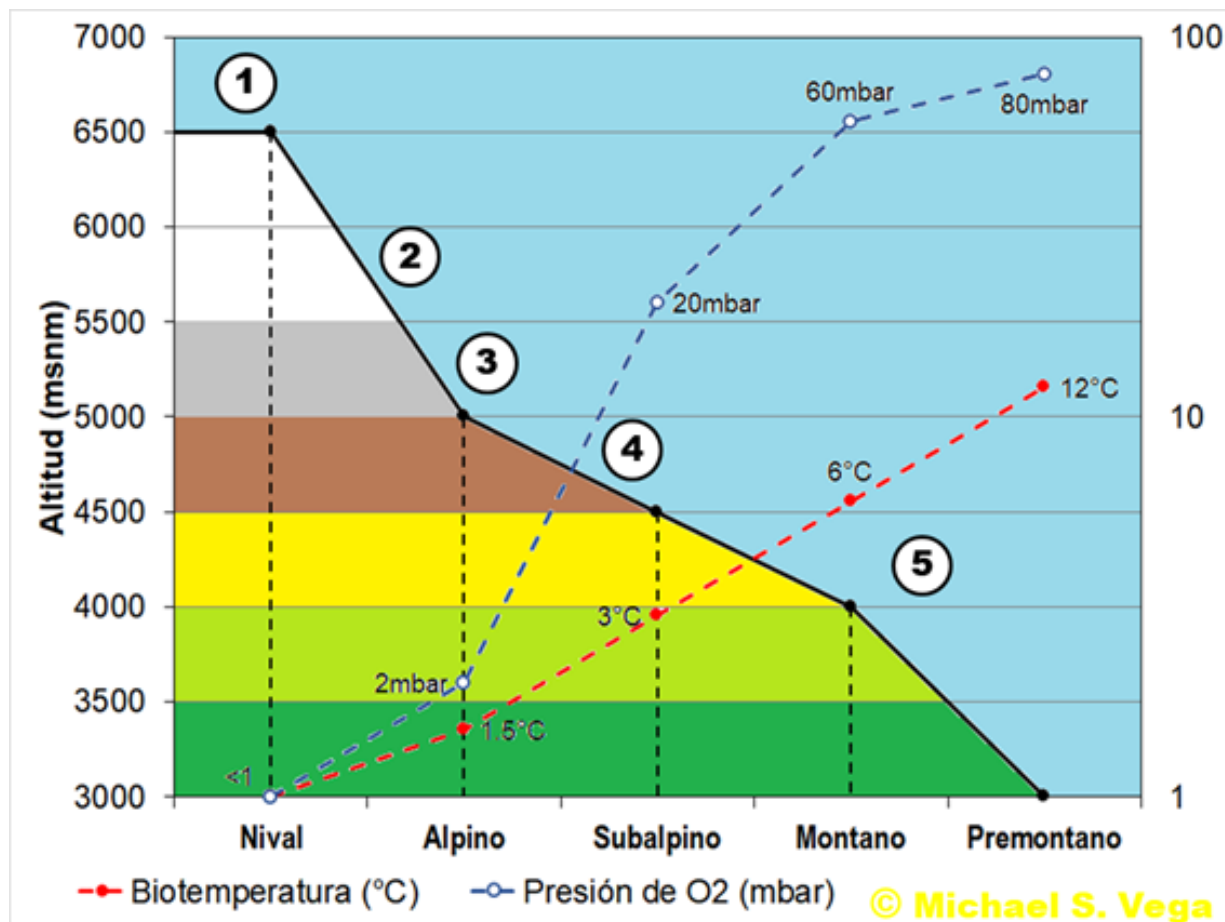


Nota. Esquema de zonas de vida de Holdridge (modificado a partir de Camacho & Lavado-Casimiro 2017). Se basa en el uso de 3 variables: la precipitación (PP) o lluvia, el porcentaje de evapotranspiración (%E) o transpiración de las plantas, y la biotemperatura (BioT) o temperatura a la cual las plantas realizan sus procesos metabólicos como la fotosíntesis. Con estas 3 variables, a manera de un triángulo, y considerando además la región latitudinal y el piso altitudinal, se establece el tipo de vegetación potencial que puede desarrollarse bajo esas condiciones ambientales, y la cual sería la zona de vida bajo este sistema ecológico.

Figura 3

Nota. Diferentes ejemplos de comunidades vegetales altoandinas con plantas vasculares: 1). Tundra en el Callejón de Conchucos (departamento de Ancash) sobre los 4500 msnm; 2). Pajonal en la Reserva Nacional de Pampas Galeras (departamento de Ayacucho) sobre los 4000 msnm; 3). Matorral andino en la comunidad de Santiago de Vado (departamento de Ayacucho) sobre los 3600 msnm; 4). Bosque de queñual en el Parque Nacional Huascarán (departamento de Ancash) sobre los 3500 msnm.

Figura 4



Nota. Etapas de la terraformación ecológica de Marte según Graham (2003, 2004, 2006), relacionándolas con los pisos altitudinales del sistema ecológico de Holdridge. 1). Marte actual, cuyas condiciones ambientales son completamente hostiles y desfavorables para la vida; 2). Ecosistema Microbiano, formado por aquellos microorganismos capaces de soportar las condiciones ambientales extremas que se encuentran en las zonas nivales altoandinas, y las mismas que son similares a las de Marte; 3). Plantas no vasculares, las cuales aparecen al bajar de la zona nival, lo mismo que ocurriría en Marte a medida que mejoren las condiciones de habitabilidad del planeta producto de la acción de los microorganismos que se establecieron en la fase anterior; 4). Plantas vasculares, las cuales aparecen en las Tundras (piso “Alpino” en el esquema de Holdridge), así como se podrían añadir al ecosistema de Marte una vez que la temperatura y la presión de O₂ aumenten lo suficiente como para permitir su crecimiento; 5). Ecosistemas templados, es decir las estepas, matorrales y boques que en encuentran en las laderas de las montañas, y ecosistemas que también podrían ensamblarse en Marte en las fases finales de su ecosíntesis planetaria. Los datos de temperatura (biotemperatura) y presión de O₂ utilizados como referencia fueron sacados de Graham (2004) y de Molina (2018).

La diversidad es la clave

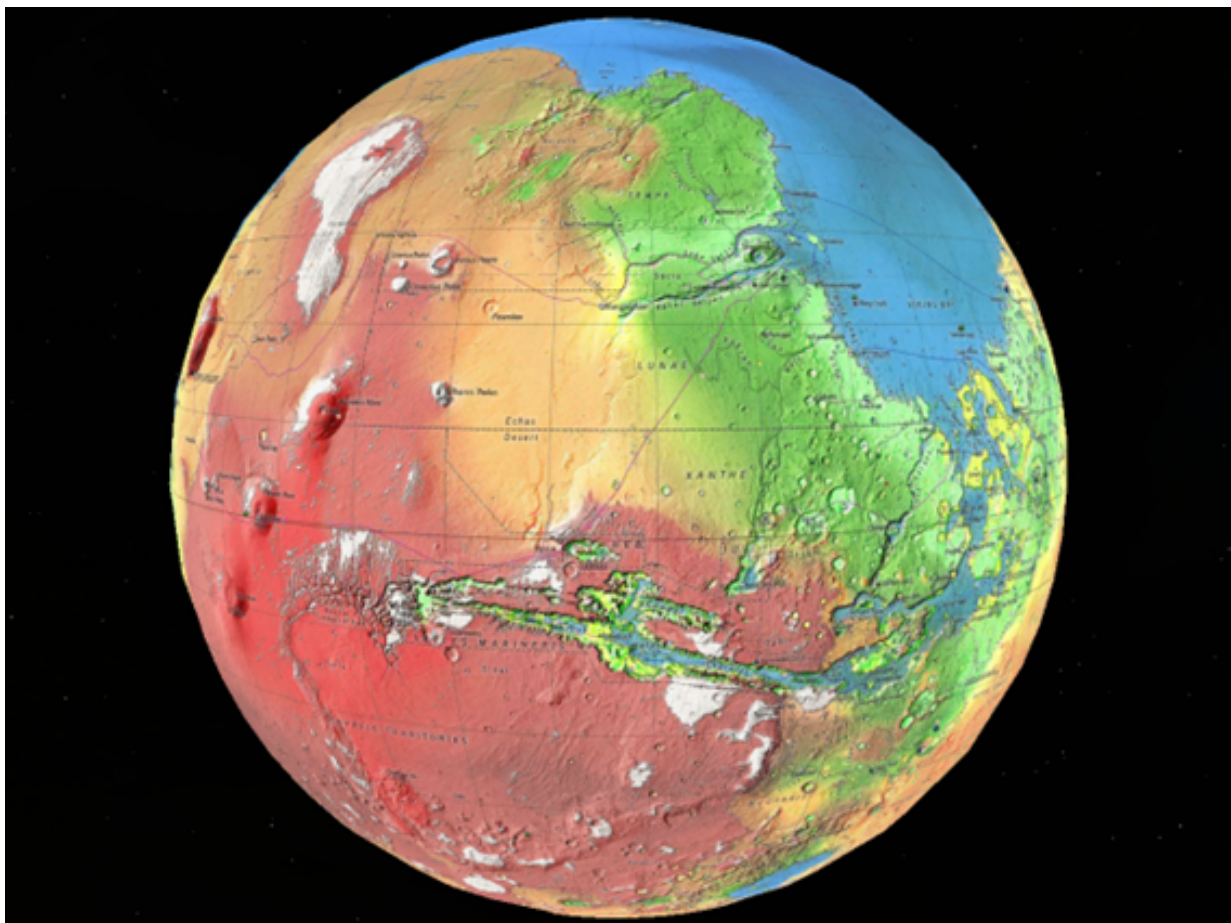
La mayor parte de los ejemplos examinados por Graham (2003, 2004, 2006), con plantas vasculares que podrían ser utilizadas para ensamblar los primeros ecosistemas y comunidades vegetales en Marte durante su proceso de terraformación, son con plantas de los hábitats boreales de Norteamérica y Europa, los cuales son ecosistemas con una muy baja

diversidad de especies; sin embargo, estas mismas son las únicas que cuentan con suficiente información publicada para ser examinadas. También cabe mencionar que dicha información en su mayor parte proviene de investigaciones básicas sobre fenómenos biológicos que no están directamente relacionados con temas de astrobiología.

Muchos de estos estudios, se generaron a partir de la preocupación existente en las últimas décadas del siglo XX por el agujero en la capa de ozono sobre la Antártida, principalmente en temas relacionados a los efectos de la radiación UV sobre varios organismos, particularmente microorganismos y algunas plantas. De igual manera hoy ocurre una situación similar con la preocupación por el calentamiento global y los estudios de adaptación de ciertas especies y ecosistemas sensibles a los cambios climáticos producto de este. Por ejemplo, los estudios de Cano et al. (2010, 2011) sobre flora y vegetación en ambientes crioturbados se enmarcan en este contexto, ya que estos ecosistemas al depender de sus ciclos de congelamiento y descongelamiento son especialmente sensibles al cambio climático. Esta clase de estudios, igualmente como en el pasado, podrían también ayudarnos en la búsqueda de más especies de plantas vasculares que podrían utilizarse para ensamblar los primeros ecosistemas sobre la superficie de Marte, sobre todo si tenemos en cuenta que estudiar terraformación y ecosíntesis planetaria es prácticamente lo mismo que estudiar un proceso de cambio climático.

Figura 5

Mapa del planeta Marte terraformado elaborado a partir de la obra de ciencia ficción “Trilogía marciana” (“Mars trilogy”) de Kim Stanley Robinson (1992-1996).



Otro estudio importante sobre ecosíntesis planetaria es el de Molina (2018) con *Pinus hartwegii* (Pinaceae), una especie de pino que crece por encima de los 4000 msnm, lo que la convierte en la especie arbórea capaz de crecer a mayor altitud del mundo, y por lo que es utilizada en dicho estudio como modelo para determinar las condiciones de sitio necesarias para el establecimiento de plantas vasculares en un Marte en proceso de terraformación. Dicho estudio se realizó en el Pico Orizaba (México); localidad que además posee una amplia biodiversidad.

Graham (2004), recomienda más bien por su parte estudiar los ecosistemas de alta montaña tropicales, como es el caso de los andes peruanos, los cuales son mucho más diversos en especies que las zonas circumpolares del hemisferio norte (Sklenář et al. 2005). La importancia de contar con una mayor cantidad de opciones de especies para ensamblar ecosistemas a la hora de plantear una ecosíntesis planetaria, está en que a mayor diversidad de especies más estable y funcional será el ecosistema resultante (Margalef 1993). Por eso, al tener una mayor variedad de organismos para ensamblar ecosistemas en Marte, el proceso de terraformación de ese planeta también podría acelerarse (Graham 2004). Esto permitiría a los futuros colonos humanos en el planeta Marte disfrutar de los beneficios de la ecosíntesis en mucho menos tiempo (Ver Figura 5). A ese respecto Cano et al. (2010, 2011) enfatizan la escasez de estudios de flora altoandina, principalmente por sobre los 4500 msnm, y que es justo donde se encontrarían las especies de plantas vasculares de interés en ecosíntesis planetaria, debido a que estas cuentan con una serie de adaptaciones para sobrevivir y reproducirse bajo condiciones de frío extremo, bajos niveles de oxígeno, y alta radiación (Hill 1909, Tovar 1993, Sklenář et al. 2005, Cano et al. 2010, 2011), las cuales son las mismas condiciones ambientales que deberán afrontar en caso de ser llevadas a otros planetas, como por ejemplo Marte (Graham 2003, 2004, 2006, Molina 2018), para intentar terraformarlos.

La flora altoandina

A continuación se pasará a mencionar a algunas familias botánicas de plantas vasculares representativas de las zonas altoandinas, muchas de estas mencionadas también por Graham (2003, 2004, 2006) como posibles colonos para crecer en los primeros ecosistemas marcianos formados por plantas terrestres. También se explicarán las principales características y adaptaciones que poseen estas plantas para sobrevivir bajo las duras y extremas condiciones ambientales de las zonas altoandinas, y que como se ha venido explicando, son similares a las condiciones extremas que tendrían que soportar en Marte durante su proceso de terraformación, lo que convierte a estas especies en interés astrobiológico.

Figura 6*Jarava ichu* (Poaceae).

Poaceae (Figura 6) es la familia botánica de las gramíneas y los pastos. En las zonas altoandinas del Perú (entre los 4000 y 5000 msnm) su especie más representativa es *Jarava ichu*, el “ichu” (“paja” en quechua); pero además existen muchos otros géneros como *Festuca*, *Agrostis*, *Calamagrostis*, *Poa*, etc (Tovar 1993, Sklenář et al. 2005). Todos estos géneros pertenecen la subfamilia Pooideae o Festucoideae, o simplemente “festucoides”. Las gramíneas festucoides se caracterizan por tener hojas duras y punzantes, y por crecer en macollos, además de ser especialmente diversas y abundantes en los ambientes fríos y zonas circumpolares. La especie *Deschampsia* antártica incluso es capaz de crecer en la Antártida. Sólo para Perú se reportan hasta 254 especies y 45 géneros de gramíneas festucoides (Tovar 1993). ¿Por qué estas plantas son tan diversas y abundantes en estos ambientes tan fríos y hostiles? Una explicación sería su tipo de polinización. Las flores de la familia Poaceae en general son aclamídeas, es decir, no poseen pétalos ni sépalos que atraigan a los animales polinizadores, así que su polinización debe realizarse a través del viento, lo que se conoce como “polinización anemófila”. Este tipo de polinización también se presenta en otras plantas gramíneas, es decir, plantas morfológicamente similares a Poaceae, como es el caso de las familias Cyperaceae y Juncaceae, y las que también son abundantes en las zonas altoandinas (Sklenář et al. 2005). La polinización anemófila es dominante en las plantas que habitan en regiones con climas polares y de alta montaña, ya que aquí los polinizadores animales son muy escasos o poco fiables (Graham 2004).

Figura 7

Hypochaeris sessiliflora (Asteraceae).



Asteraceae (Figura 7), antiguamente llamada también “Compuesta”, es la familia botánica de las margaritas y los girasoles. Las zonas altoandinas son particularmente diversas en especies de esta familia (Sklenář et al. 2005). Muchas especies altoandinas poseen flores sumamente coloridas y vistosas, como lo son en los géneros *Hypochaeris*, *Paranephelium*, *Perezia*, *Werneria*, entre muchos otros; mientras que otras especies más bien poseen flores poco llamativas, como en los géneros *Belloa*, *Erigeron*, *Gnaphalium*, *Loricaria*, *Mniodes*, *Xenophyllum*, y por lo que estas muy difícilmente pueden atraer polinizadores (Sklenář et al. 2005). En muchas especies de Asteraceae se ha reportado la reproducción por apomixis (Graham 2004), un tipo de reproducción asexual donde el óvulo que va a producir la semilla se fecunda a sí mismo, y por lo que al germinar dichas semillas producirán individuos genéticamente idénticos a la planta madre. Una ventaja de la apomixis es que permite producir una gran cantidad de semillas y ocupar grandes porciones de terreno en muy poco tiempo, razón por la cual las plantas con esta estrategia suelen ser malezas o invasoras de cultivos. En Asteraceae, *Taraxacum officinale* o “diente de león”, suele ser un buen ejemplo de una especie invasora muy bien estudiada que utiliza esta estrategia reproductiva para propagarse.

Figura 8

Astragalus sp (*Fabaceae*).



Fabaceae (Figura 8) es la familia botánica de las leguminosas, tales como el frijol, la soya, y las habas (“faba” significa “haba” en latín, siendo esto lo que le da su nombre a la familia). Los géneros andinos que crecen a mayor altitud son *Astragalus* y *Lupinus* (Cano et al. 2010, 2011). Muchas de las especies de Fabaceae además de poseer polinización cruzada pueden autofecundarse, lo que se conoce como polinización autógama (Graham 2004). A diferencia de la apomixis, en la polinización autógama sí ocurre recombinación genética, por lo que la pérdida de variabilidad no es tan severa. Este tipo de plantas que poseen polinización autógama, y que además potencialmente pueden ser polinizadas por animales, serían de mucha ayuda en las primeras comunidades vegetales que podrían colonizar otros planetas como Marte, ya que ayudarían también a establecer a los primeros animales polinizadores una vez que estos puedan ser introducidos dentro del proceso de ecosíntesis.

Figura 9

Pycnophyllum molle (Caryophyllaceae).



Caryophyllaceae (Figura 9) es la familia botánica de los claveles (*Dianthus caryophyllum*) y los nadeshiko (*D. japonicus*), pero también aquí pertenecen una amplia gama de especies que habitan en las zonas templado-frías de todo el mundo (Font Quer 1978). Incluso la especie *Colobanthus quitensis* es capaz de habitar tanto en las zonas altoandinas como en la Antártida, y en dónde es llamada “perla antártica” o “clavel antártico” (Sklenář et al. 2005). Dentro de las zonas altoandinas del Perú encontramos géneros como *Pycnophyllum* y *Arenaria* (Cano et al. 2010, 2011). Estas plantas crecen formando tapetes o cojines compactos, propagándose también por estolones. Sus flores suelen ser inconspicuas (Sklenář et al. 2005), es decir permanecen cerradas hasta la polinización, lo cual favorece a la polinización autógama, y les da una estrategia reproductiva muy similar a la mencionada para Fabaceae.

Figura 10*Ephedra rupestris* (Ephedraceae)

Ephedraceae (Figura 10) es una familia que pertenece a la división de las coníferas o Gimnospermas, y suele estar formada por pequeños arbustos que crecen en las zonas boreales y árido-desérticas de todo el mundo (Font Quer 1978). En la zona altoandina contamos con dos especies del género *Ephedra* (Cano et al. 2005, 2006, 2010, 2011). Estas especies suelen ser pequeñas plantas leñosas decumbentes o postradas sobre el suelo para protegerse de los vientos congelados, sus hojas son escamiformes por lo que su tallo se encarga principalmente de la fotosíntesis (Sklenář et al. 2005), cosa que además le permite optimizar el uso del agua al evitar su pérdida por transpiración. La capacidad para optimizar el uso del agua para resistir estrés hídrico también es una característica deseable en las plantas vasculares que se estaría planeando enviar a Marte para ensamblar ecosistemas, ya que en las primeras etapas de la terraformación la disponibilidad de agua será escasa (Graham 2004). *Ephedra* se presenta como una candidata ideal para ser utilizada en la ecosíntesis planetaria, no sólo por ser una planta resistente a la falta de agua (estas especies también pueden ser encontradas habitando en el desierto costero peruano), sino que además al ser una Gimnosperma, no posee flores propiamente dichas sino que sus verticilos florales se encuentran expuestos y al aire libre, por lo que su reproducción no depende de polinizadores animales (Sklenář et al. 2005), tal y como ya se ha examinado en los grupos de plantas anteriores.

Figura 11

Austrocyllindropuntia floccosa (Cactaceae).



Cactaceae (Figura 11), como su nombre lo indica es la familia de los cactus, y después de Bromeliaceae es la familia endémica del continente americano más grande en especies, siendo además los andes peruanos una de las regiones de su mayor diversidad (Ostolaza 2019). Las plantas de esta familia se caracterizan por poseer la capacidad de almacenar agua en sus tejidos, razón por la cual también se les denomina “plantas suculentas”, y esta característica unida a su fotosíntesis CAM (“metabolismo del ácido crasuláceo” por sus siglas en inglés), convierte a Cactaceae en una de las familias botánicas que mejor soporta la sequía y el estrés hídrico, debido a su uso más eficiente del agua (Anderson 2001). El principal género de Cactaceae que presenta especies capaces de crecer en zonas altoandinas por encima de los 4000 msnm es *Austrocyllindropuntia* (Sklenář et al. 2005, Ostolaza 2019), el cual además pertenece a la subfamilia Opuntioideae, grupo donde las plantas forman sus semillas predominantemente por apomixis (Castro 2006).

Figura 12

Nototriche pinnata (Malvaceae).



Malvaceae (Figura 12) es la familia botánica de las malvas, las cucardas, la jamaica, el algodón y un largo etcétera (Font Quer 1978). En los ecosistemas altoandinos el género *Nototriche* es sumamente diverso y está muy bien adaptado a este medio ambiente (Hill 1909, Chanco y Ulloa 2004, Cano et al. 2010, 2011). Aunque la polinización en Malvaceae es principalmente mediada por insectos como las abejas, en cultivos de algodón (*Gossypium barbadense*) se ha encontrado que esta planta también es capaz de autopolinizarse si sus flores no llegan a ser visitadas. Es posible que *Nototriche* también tenga esta misma estrategia, tal y como también se ha mencionado para Fabaceae y Caryophyllaceae. Sin embargo, ¿qué pasaría si también existieran insectos polinizadores capaces de adaptarse al medio ambiente marciano? Aunque sí existen insectos capaces de vivir cerca de las zonas polares y de alta montaña, el factor limitante para estos durante la ecosíntesis de Marte será el oxígeno. No existen estudios sobre los requerimientos de oxígeno mínimo para los insectos, pero si existiesen especies capaces de sobrevivir con presiones de oxígeno menores a 20 mbar (que es lo mínimo que se estima para hacer crecer plantas vasculares en Marte, ver Figura 3), se podría ampliar en mayor medida el número de especies vegetales para ser utilizadas en ecosíntesis planetaria.

Figura 13*Saxifraga magellanica* (Saxifragaceae)

Saxifragaceae (Figura 13) es una familia relacionada con las “siempre vivas” (familia Crassulaceae), y distribuida principalmente en las regiones árticas y templado-frías de todo el mundo. Su nombre deriva del latín “saxum” = “piedra”, y “frangere” = “romper” o “quebrar”; ya que estas plantas suelen ser rupícolas (crecen sobre las rocas) y sus raíces suelen afianzarse al sustrato penetrando entre las fisuras de las rocas, lo que termina por erosionarlas y fragmentarlas (Font Quer 1978). En el Perú la única especie de esta familia es *Saxifraga magellanica*, la cual es capaz de crecer hasta cerca de los 5000 msnm (Cano et al. 2005, 2006, 2010, 2011). Entre las especies de Saxifragaceae de la región ártica se ha encontrado resistencia a condiciones de anoxia (falta total de oxígeno), lo cual sería una adaptación de estas especies para sobrevivir cuando terminan cubiertas por la nieve y el hielo que se forma en su hábitat (Graham 2004). Esta adaptación muy posiblemente también se encuentre presente en las demás familias botánicas mencionadas en el presente artículo, sobre todo en aquellas plantas que son perennes.

Figura 14

Distichia muscoides (Juncaceae).



Juncaceae (Figura 14), como su nombre lo indica, es la familia de los juncos (género *Juncus*); aunque no todas las plantas que se conocen comúnmente como “junco” pertenecen a esta familia, ya que el término hace referencia de forma genérica a cualquier planta acuática o ligada a zonas húmedas, con tallos erectos y cilíndricos, descripción que abarca a muchas especies graminoides de otras familias que ya han sido mencionadas como Cyperaceae y Poaceae. A esta familia pertenece la especie *Distichia muscoides*, la cual es una de las especies clave de los bofedales o turberas altoandinas (Figura 15), que son formaciones vegetales hidromórficas que se desarrollan en fondos de quebradas, pendientes o planicies andinas por encima de los 3000 msnm (Cano et al. 2005, 2006, Gonzáles et al. 2016). Esta especie es una planta acuática que crece formando densos cojines o almohadillas, los cuales retienen el agua a manera de esponjas, y mantienen al ecosistema del bofedal. Lo que hace interesante desde el punto de vista astrobiológico a las plantas acuáticas altoandinas es su capacidad de sobrevivir con niveles mínimos de oxígeno, por lo que Graham (2004) menciona que las primeras plantas vasculares que podrían ser enviadas a terraformar Marte podrían ser plantas acuáticas, como los son en este caso *Distichia muscoides* y otras especies que habitan los bofedales altoandinos. En lo que respecta a su reproducción, en *Distichia muscoides* predomina la reproducción asexual por formación de estolones que expanden la cobertura de sus cojines; sin embargo su reproducción sexual también se da con significativa frecuencia, debiendo a ser esta una especie dioica (hay plantas que sólo producen flores masculinas, y otras sólo flores femeninas), lo que obliga a la polinización

cruzada, y lo que mantiene su variabilidad genética (González et al. 2016).

Figura 15

Bofedal en el Callejón de Conchucos (departamento de Ancash) sobre los 4500 msnm.



Isoetaceae, es una pequeña familia de plantas vasculares sin semillas, lo que antiguamente se conocía como “pteridófitos”, pero lo cierto es que las plantas de esta familia se encuentran emparentadas con los licopodios (división Lycophyta), y no con los helechos verdaderos (división Monilophyta). El género *Isoetes* está formado por especies que habitan principalmente en ambientes acuáticos y pantanosos como los bofedales altoandinos por encima de los 4000 msnm (Sklenář et al. 2005), y en donde permanecen casi siempre sumergidos en el agua o en la turba de materia orgánica que conforma estos ambientes, de modo que apenas la parte superior de sus hojas consigue salir a la superficie, lo que obliga a estas plantas a soportar condiciones de hipoxia (“poco oxígeno”). Además, aunque la fotosíntesis CAM se ha registrado en algunas especies epífitas de plantas vasculares sin semillas, esta también se ha observado en las especies altoandinas de *Isoetes* (León 2002). En *Isoetes andicola*, la cual también se caracteriza por no presentar estomas, se registró por primera vez un caso de asimilación de CO₂ a través de las raíces (Keeley et al. 1984, Raven 1993). Estas características, sumadas a su reproducción por esporas que libra a estas plantas de la dependencia de otros organismos polinizadores, también hacen que las especies altoandinas de Isoetaceae puedan ser consideradas de interés para la ecosíntesis planetaria.

Conclusiones

Lo que vuelve de interés astrobiológico a la flora vascular de las zonas altoandinas, en especial para ser utilizada en ecosíntesis planetaria, son sus adaptaciones para soportar el frío extremo, la baja presión atmosférica, bajos niveles de oxígeno, estrés hídrico, y altos niveles de radiación, ya que son estos mismos factores los que deberán soportar en planetas como Marte incluso durante las etapas finales de su proceso de terraformación. También es fundamental tener en cuenta su tipo de reproducción, ya que esto además será el factor que les permitirá perpetuarse y colonizar otros ambientes fuera del planeta Tierra.

En este sentido, las especies altoandinas aventajan a las especies de las zonas boreales y circumpolares en su mucho mayor diversidad. Al ensamblar un ecosistema con un mayor número de especies este puede ser más estable y funcional, y en el caso la ecosíntesis planetaria, ayudar a acelerar el proceso en sí.

Aunque en el presente artículo se han mencionado ejemplos de sólo 10 familias de la flora vascular altoandina del Perú, lo cierto es que muy posiblemente el resto de familias que habitan estos ecosistemas también sean de interés astrobiológico, dado que estas deben de soportar las mismas condiciones medioambientales extremas de los altos andes. Sin embargo, la flora del Perú aún se encuentra muy lejos de estar completamente estudiada, existiendo zonas del país que no han sido debidamente exploradas y de las que se desconoce su flora, y aún peor, existe escasa o nula información sobre aspectos básicos de la biología de muchas de las especies ya conocidas. Esto dificulta el saber con precisión qué especies de la flora altoandina serían las más adecuadas para soportar las condiciones ambientales de planetas como Marte, y para ser utilizadas en ecosíntesis planetaria.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés entre ellos ni con terceros.

Referencias

- Anderson, E. F. (2001). *The Cactus Family*. Timber Press.
- Brako, L. & Zarucchi, J. L. (1993). *Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru*. Missouri Botanical Garden.
- Camacho, C. L. A., & Lavado-Casimiro, W. (2017). Atlas de zonas de vida del Perú: guía explicativa. Nota Técnica No 003 SENAMH-DHI-2017. *Repositorio Institucional SENAMHI* 19. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/259>
- Cano, A., La Torre, M. I., Monsalve, C., Roque, J., Mendoza, W., Salinas, I., Castillo, S. & Aponte, H. (2005). *Las Plantas Comunes de San Marcos (Huari, Ancash)*. Guía de Campo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Museo de Historia Natural. Serie de divulgación N° 12.
- Cano, A., La Torre, M. I., Castillo, S., Aponte, H., Morales, M., Mendoza, W., León, B., Roque, J., Salinas, I., Monsalve, C. & Beltrán, H. (2006). *Las Plantas Comunes del Callejón de Conchucos (Ancash, Perú)*. Guía de Campo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Museo de Historia Natural. Serie de divulgación N° 13.
- Cano A, Delgado A, Mendoza W, Castillo S, Morales M, La Torre M. I., Chanco M, Aponte H, Delgado A, Valencia N, Vega N. (2010). Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 95-103. <https://doi.org/10.15381/rpb.v17i1.56>

- Cano A, Delgado A, Mendoza W, Trinidad H, Gonzáles P, La Torre M. I., Chanco M, Aponte H, Roque J, Valencia N, Navarro E. (2011). Flora y vegetación de suelos crioturbados y hábitats asociados en los alrededores del abra Apacheta, Ayacucho – Huancavelica (Perú). *textitRevista Peruana de Biología*, 18(2), 169-178.
<https://doi.org/10.15381/rpb.v18i2.224>
- Castro V. (2006). *Taxonomía de la familia Cactaceae en el valle de río Chillón, Lima: cerro Umarcata y quebrada Orobel*. [Tesis Magister, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio de la UNALM.
- Chanco, M., & Ulloa, C. U. (2004). Las especies de Nototriche (Malvaceae) de Ecuador. *SIDA Contributions To Botany*, 21(2), 693-703.
<https://siis.unmsm.edu.pe/en/publications/las-especies-de-nototriche-malvaceae-de-ecuador>
- Font Quer, Pio. (1978). *Botánica Pintoresca*. Ramón Sopena S. A.
- Gonzáles P. Suni M., Deanna R., Scaldaferrero M. A., Castañeda E., Ramirez D. W., Valencia N., & Cano A. (2016). Biología reproductiva y citogenética de *Distichia muscoides* (Juncaceae). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 51(1), 123-133. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v51.n1.14422>
- Graham J. M. (2003). Stages in the Terraforming of Mars: The Transition to Flowering Plants. *AIP Conference Proceedings*, 654(1), 1284.
<https://doi.org/10.1063/1.1541431>
- Graham J. M. (2004). The Biological Terraforming of Mars: Planetary Ecosynthesis as Ecological Succession on a Global Scale. *Astrobiology* 4(2), 168-195.
<https://doi.org/10.1089/153110704323175133>
- Graham J. M. (2006). Planetary Ecosynthesis as Ecological Succession. *Gravitational and Space Biology*, 19(2), 105-120. <https://typeset.io/pdf/planetary-ecosynthesis-as-ecological-succession-4sb2vhua41.pdf>
- Hill, A. (1909). A Revision of the Genus *Nototriche*, Turcz. *Transactions of the Linnean Society of London. 2nd Series. Botany*, 7(12), 201-266.
<https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1909.tb00179.x>
- Keeley J. E., Osmond C. B. & Raven J. A. (1984). Stylites, a vascular land plant without stomata absorbs CO₂ via its roots. *Nature*, 310, 694-695.
<https://doi.org/10.1038/310694a0>
- León, B. (2002). Los helechos y los ambientes xéricos. *Quepo*, 16, 84-87.
- Margalef, R. (1993). *Teoría de los Sistemas Ecológicos*. Publicacions Universitat de Barcelona.
- McKay, C. P. & Maninova M. M. 2001. The Physics, Biology, and Environmental Ethics of Making Mars Habitable. *Astrobiology*, 1(1), 89-109.
<https://doi.org/10.1089/153110701750137477>
- McKay, C. P. (2009). Planetary ecosynthesis on Mars: restoration ecology and environmental ethics. In C. M. Bertka (Ed.), *Exploring the Origin, Extent, and Future of Life: Philosophical, Ethical and Theological Perspectives* (pp. 245–260). Cambridge University Press.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2015). Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. *Ministerio del Ambiente*.
<https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/178>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2018). Definiciones Conceptuales de los Ecosistemas del Perú. Viceministerio de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales, Dirección General de Diversidad Biológica. *Ministerio del Ambiente*.

- <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/definiciones-conceptuales-ecosistemas-peru>
- Molina P., Navarro-González R. McKay C. P., Martínez-Sosa P., & Ezquível-Hernandez L. (2014). Effect of soil quality on determining the timberline at the pico de Orizaba. *AGU fall meeting*.
<https://agu.confex.com/agu/fm14/meetingapp.cgi/Paper/17808>
- Molina P. (2018). *Evaluación de las condiciones de sitio en un medio extremo: el caso del pico de Orizaba (Citlaltépetl) con una perspectiva de colonización de Marte*. [Tesis Magister Universidad Nacional Autónoma de México]. UNAM.
- Ostolaza, C. (2019). *Todos los Cactus del Perú. Segunda edición corregida y actualizada*. Sociedad Peruana de Cactáceas y Suculentas (SPECS).
- Pazar, C. C. (2018). *Terraforming of Terrestrial Earth-sized Planetary Bodies*. B.A. Earth and Planetary Sciences, University of Colorado Boulder.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20309.12009>
- Peterson, R.A., Walker, D.A., Romanovsky, V.E., Knudson, J.A., Raynolds M.K. & Krantz, W.B. (2003). A differential frost heave model: cryoturbation-vegetation interactions. In: Phillips M., Springman S. M. & Arenson, U. (eds). *Permafrost, Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost*. Institute for Geotechnical Engineering, Zürich, Switzerland. Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, The Netherlands, II, 885–890.
- Raven, J. A. (1993). The Evolution of Vascular Plants in Relation to Quantitative Functioning of Dead Water-Conducting Cells and Stomata. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 68(3), 337-363.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.1993.tb00735.x>
- Robinson, K. S. (1992-1996). *Mars trilogy (Vols. 1-3)*. Bantam Spectra publisher.
- Sklenář, P., Luteyn, L., Ulloa, C., Jørgensen, P. & Dillon, M. (2005). *Flora Genérica de los Páramos. Guía Ilustrada de las Plantas Vasculares*. Memoirs of the New York Botanical Garden.
- Tovar, O. (1993). *Las Gramíneas (Poaceae) del Perú*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://bibdigital.rjb.csic.es/records/item/1525858-las-gramineas-poaceae-del-peru?offset=1>
- Ulloa, C.; Zarucchi, J. & León, B. (2004). *Diez Años de Adiciones a la Flora Peruana, 1993 – 2003*. [PDF en línea]
- Van der Werff H. & Consiglio T. (2004). Distribution and conservation significance of endemic species of flowering plants in Peru. *Biodiversity and Conservation*, 13(9), 1699-1713. <https://doi.org/10.1023/b:bioc.0000029334.69717.f0>
- Weberbauer, A. (1945). *El Mundo Vegetal de los Andes Peruanos. Estudio Fitogeográfico. Estación Experimental Agrícola de La Molina*. Ministerio de Agricultura. Lume.