

Zona de habitabilidad subsuperficial en Marte

La *zona de habitabilidad subsuperficial* en Marte se refiere al rango de profundidades bajo la superficie donde podrían darse condiciones de **agua líquida estable**, dadas las presiones y temperaturas allí existentes. A diferencia de la superficie marciana –extremadamente fría y con atmósfera tenue– el interior del planeta ofrece temperaturas más cálidas (debido al gradiente geotérmico) y presiones mayores (por el peso del material suprayacente), condiciones que **acercan al agua a su región líquida en el diagrama de fases**. A continuación, exploramos las condiciones físicas y geoquímicas del subsuelo marciano, las profundidades estimadas para la estabilidad de agua pura versus salina, el papel de distintas sales en la estabilidad del agua, y las posibles implicaciones astrobiológicas de una zona subsuperficial habitable.

Condiciones físicas y geoquímicas del subsuelo marciano

Temperatura y gradiente geotérmico: La temperatura media en la superficie de Marte es muy baja (en torno a -60°C globalmente, con $\sim -50^{\circ}\text{C}$ en el ecuador y hasta $< -120^{\circ}\text{C}$ en regiones polares) ¹ ². Sin embargo, la temperatura aumenta con la profundidad debido al calor interno del planeta. Se estima un **gradiente geotérmico** marciano en el rango de ~ 6 a 10 K por kilómetro, dependiendo de la composición y humedad del terreno ³. Un gradiente menor ($\sim 6\text{ K/km}$) correspondería a rocas/gelisoles con alta conductividad (p.ej. hielo en poros), mientras que un gradiente mayor ($\sim 10\text{ K/km}$) se daría en regolito seco más aislante térmicamente ³. Aunque el flujo de calor en Marte es más bajo que en la Tierra, este gradiente implica que a unos pocos kilómetros de profundidad el subsuelo podría alcanzar temperaturas suficientes para derretir el hielo presente.

Presión con la profundidad: La atmósfera marciana ejerce una presión promedio de apenas $\sim 6\text{--}8\text{ mbar}$ en la superficie (equivalente a $\sim 0.6\%$ de la presión terrestre), lo que está por debajo del punto triple del agua ($\sim 6.1\text{ mbar}$). A presión tan baja, el agua pura en la superficie no puede permanecer líquida: **hierve o se sublima inmediatamente** con ligeros calentamientos ⁴ ⁵. Sin embargo, bajo tierra la presión aumenta rápidamente con la profundidad debido al peso de las capas superiores (presión litostática). En un medio poroso confinado, a decenas o cientos de metros de profundidad la presión en posibles bolsillos de agua/ hielo sería muy superior a la atmosférica, **permitiendo la existencia de agua líquida** sin que ésta hierva ⁵. Además, en depresiones topográficas de Marte (por ejemplo, el fondo de cráteres profundos o la cuenca Hellas, $\sim 8\text{ km}$ bajo el datum) la presión atmosférica local es mayor, elevando ligeramente la temperatura de ebullición y favoreciendo la estabilidad de líquidos en capas poco profundas ⁵.

Estructura del subsuelo (deseccación y criósfera): Los primeros metros a decenas de metros del suelo marciano tienden a estar extremadamente secos (*zona desecada*) por la pérdida de volátiles hacia la atmósfera ⁶. Por debajo, en amplias regiones se extiende una **criósfera**: una capa de terreno permanentemente helado (hielo de agua y/o clatratos de CO_2 cimentando el regolito) que perdura hasta donde la temperatura subterránea supera el punto de fusión del hielo ⁷. Estudios geofísicos clásicos estimaban que **la base de la criósfera** (donde el hielo puede derretirse) se encuentra a unos $\sim 2\text{--}5\text{ km}$ de profundidad en latitudes bajas y medias, profundizándose hacia los polos (quizá $6\text{--}12\text{ km}$) ⁸. Modelos más recientes sugieren que la criósfera actual podría ser incluso *más espesa*, duplicando aproximadamente esos valores en algunas áreas ⁹. Por ejemplo, para condiciones promedio actuales se calcula que el suelo ecuatorial permanecería congelado hasta **$\sim 4\text{ km}$** de profundidad, aumentando a **$\sim 5\text{--}6\text{ km}$** en zonas templadas ($\sim 45^{\circ}$ lat) y excediendo **15 km** cerca de los polos ⁷ ¹⁰. En regiones

polares, de hecho, el calor interno es tan bajo y la capa de hielo tan gruesa que *ninguna profundidad poco razonable presentaría temperaturas por encima del punto de fusión* – Marte tendría un “permafrost” prácticamente infinito allí ¹⁰ . La composición del subsuelo influye en esto: por encima de ~500 m de profundidad en el ecuador se espera regolito seco, pero gradualmente aumenta el hielo en poros debajo de esa profundidad ⁶ . La presencia de hielo mejora la conductividad térmica y hace que la transición a temperaturas de fusión ocurra más profundo que si el terreno estuviese seco (aislante) ³ .

Geoquímica y salinidad del terreno: Las misiones marcianas han revelado que el subsuelo no es químicamente puro, sino rico en sales minerales solubles que afectan las propiedades del agua. En distintos sitios se han detectado **percloratos** (sales de ClO_4^-) de calcio, magnesio o sodio, así como cloruros y sulfatos, entre otros ¹¹ . En particular, el *lander* Phoenix (2008) descubrió perclorato de calcio en el ártico marciano, y el rover Curiosity (2012) confirmó la presencia de percloratos y sulfatos en las rocas y suelos de Gale. Estas sales son muy relevantes, ya que **reducen el punto de congelación del agua** y pueden formar *salmueras* estables a temperaturas bajo cero, modificando sustancialmente la profundidad a la que puede existir agua líquida (se detalla más adelante). También influyen en la presión de vapor del agua y en la química del posible líquido, con implicaciones para la habitabilidad. En suma, el subsuelo marciano es un medio frío, árido y salino; pero bajo suficientes kilómetros de aislamiento, las condiciones de presión y calor podrían cruzar el umbral necesario para la aparición de **agua en estado líquido**.

Profundidades estimadas para agua líquida pura y salina

Dado el contexto anterior, podemos delimitar la zona subsuperficial donde el agua sería líquida. **Para agua pura (sin solutos)**, Marte requiere profundidades considerables: según modelos geotérmicos, en regiones ecuatoriales el hielo alcanzaría 0 °C (~273 K) a unos ~8 km de profundidad en la actualidad ¹² . Es decir, no se esperaría agua líquida *pura* en el subsuelo hasta por debajo de la base de la criósfera (~8 km en bajas latitudes). En cambio, **para agua salobre o salmuera** el punto de fusión es menor; las *primeras* películas de agua líquida podrían aparecer a menos profundidad. Modelos termodinámicos indican que **salmuera concentrada (eutéctica)** podría empezar a formarse con apenas ~30 K de calentamiento sobre la temperatura media superficial local ¹³ . En el ecuador (~220 K de temperatura media anual), esto implica que alrededor de **3-4 km de profundidad** bastarían para llegar a ~250 K, suficiente para derretir las mezclas de hielo con sales más efectivas ¹⁴ ⁶ . De hecho, se ha calculado un rango de ~2.8 a 4.7 km para la aparición de las *primeras* salmueras en el ecuador, dependiendo de si el terreno es seco o está saturado en hielo ⁶ . Un valor medio estimado es ~3.7 km de profundidad para encontrar agua en estado líquido altamente salino en Marte ecuatorial ⁶ . En latitudes medias (por ejemplo ~45°N/S, con T superficial ~200–210 K) la profundidad requerida aumenta a unos **5-6 km** para las salmueras iniciales, dada la temperatura más fría en superficie ¹⁵ . Y hacia los polos (T ~150 K), como se mencionó, ni siquiera a 15 km se alcanzaría el punto de fusión si asumimos condiciones estáticas actuales ¹⁰ .

En resumen, **el rango de profundidades “habitables” para agua líquida en Marte** estaría comenzando aproximadamente entre 3 y 6 km bajo el suelo en la mayor parte de las latitudes bajas-medias, extendiéndose hacia abajo todo lo que el gradiente térmico permita (teóricamente hasta profundidades enormes, antes de que el agua pase a fase supercrítica alrededor de ~374 °C). Cabe señalar que estos valores suponen el escenario actual de clima frío y bajo flujo de calor. Evidentemente, **cualquier fuente de calor local o pasado más intenso** (p. ej. actividad volcánica residual) podría reducir significativamente la profundidad a la primera agua líquida. Por ejemplo, regiones cerca de un cuerpo ígneo caliente podrían tener gradientes mayores localmente, posibilitando salmuera a pocos cientos de metros o menos, al menos transitoriamente ¹⁶ . Pero globalmente, Marte hoy exige perforar **varios kilómetros** para alcanzar temperaturas y presiones compatibles con agua estable.

Efecto de la salinidad en la profundidad: La diferencia de ~4–5 km entre las curvas de agua pura y agua muy salada en el ecuador (8 km vs ~3–4 km) ilustra cuánto extiende la salinidad la zona habitable ⁶. Una salmuera eutéctica (con congelación muy deprimida) puede existir a temperaturas ~25 K inferiores a 0 °C, lo que equivale a unos kilómetros menos de profundidad necesaria ¹². En la práctica, **un mayor contenido de sales “eleva” la zona habitable hacia la superficie**, haciendo posible encontrar líquidos a menor profundidad que si el agua fuera pura. Por ejemplo, se ha destacado que Marte (ecuatorial) tiene temperatura media (~50 °C) sólo unos 25 °C por encima del punto de congelación de la *salmuera de perclorato de calcio* (~75 °C), lo que “*sugiere la existencia de una zona donde dicha salmuera podría permanecer líquida, particularmente en el subsuelo*” ¹. Esto refuerza la idea de que debajo de unos cuantos kilómetros, allí donde la presión ya no es limitante, **la presencia de sales permite la existencia de agua líquida incluso a temperaturas muy por debajo de 0 °C**.

Evidencias observacionales: Hasta ahora no se ha accedido directamente a tales profundidades en Marte, pero existen indicios indirectos de agua subterránea. Un hallazgo notable fue el **posible lago subglacial** bajo el casquete polar sur, detectado por el radar MARSIS (Mars Express) en 2018. Un reflejo brillante a ~1.5 km bajo el hielo polar sugiere una capa de líquido de ~20 km de ancho ² ¹⁷. Dado que la superficie polar está a ~-100 °C, se deduce que *el agua allí debe ser altamente salina* (eutéctica) y está sometida a gran presión bajo 1.5 km de hielo, lo que le permite permanecer líquida ¹⁸. Este descubrimiento confirma que **incluso en las regiones más frías de Marte puede haber agua líquida en el subsuelo** si concurre una combinación de **presión suficiente y sales con bajo punto de congelación** ¹⁸. Por contraste, en zonas menos profundas: las enigmáticas *líneas de pendiente recurrentes* (RSL), estrías oscuras que aparecen en laderas cálidas en verano marciano, inicialmente se interpretaron como posibles escurrimientos de salmuera superficial. Sin embargo, análisis recientes sugieren que su dinámica es más consistente con flujos de arena seca sin agua involucrada ¹⁹. Esto enfatiza que **el agua líquida estable es sumamente escasa o efímera en los primeros metros de suelo**, y que la auténtica zona húmeda de Marte yace a kilómetros de profundidad.

Para sintetizar cuantitativamente estos rangos, la siguiente tabla compara, de forma aproximada, la profundidad mínima estimada para la estabilidad de agua líquida en Marte según distintos niveles de salinidad, asumiendo condiciones termales ecuatoriales promedio (gradiente geotérmico moderado):

Composición del agua	Temp. de congelación aprox.	Profundidad mínima estimada (ecuador)
Agua pura (H₂O)	273 K (0 °C)	~8 km (requiere alcanzar ~273 K) ¹²
Agua salina moderada (NaCl, CaCl ₂)	~233–250 K (-40 a -23 °C)	~5–6 km (punto de fusión algunos °C bajo cero) ²⁰
Salmuera eutéctica (percloratos Mg/Ca)	~198–206 K (-75 a -67 °C)	~3–4 km (basta ~250 K para derretir) ⁶

Nota: La categoría “agua salina moderada” abarca sales comunes como cloruros o sulfatos, cuyas disoluciones saturadas congelan a decenas de grados bajo cero (por ejemplo, CaCl₂ ~223 K, NaCl ~252 K). La profundidad indicada es una interpolación cualitativa basada en la diferencia de ~25 K (~4 km) entre agua pura y salmuera extrema ¹²; *fuentes exactas para cada sal pueden variar ligeramente*. En general, sales más efectivas (percloratos) permiten líquidos a menores profundidades, mientras que agua menos salada requerirá profundidades más cercanas al caso de agua pura.

Tipos de sales relevantes y su influencia en la estabilidad del agua

La **salinidad** es un factor clave que expande la región de estabilidad del agua en Marte. Las sales disueltas alteran el diagrama de fase del agua de dos formas principales: **(1)** reducen la temperatura de congelación (punto de fusión del hielo) y **(2)** disminuyen la presión de vapor del líquido (y elevan ligeramente su punto de ebullición). En Marte, donde el frío y la baja presión superficial son los obstáculos para el agua, la presencia de sales es decisiva para permitir fases líquidas.

Entre las sales identificadas o inferidas en Marte, destacan:

- **Percloratos** (especialmente de *magnesio, calcio y sodio*): Son altamente higroscópicos y forman brines con los puntos de congelación más bajos conocidos. Sus **eutécticos** (temperatura mínima de fusión) están en el rango de **~206 K** para $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ (perclorato de magnesio, $\sim -67^\circ\text{C}$) y **~198 K** para $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$ (perclorato de calcio, $\sim -75^\circ\text{C}$) ²¹ ¹. Incluso el perclorato de sodio (NaClO_4) funde cerca de 236 K ($\sim -37^\circ\text{C}$) ²¹, mucho menor que 273 K. Esto significa que **salmueras de perclorato permanecen líquidas a temperaturas donde el agua pura estaría sólidamente congelada**. Además, los percloratos tienden a absorber humedad de la atmósfera (deliquesencia), facilitando la formación de brines transitorios en el suelo superficial en noches frías. Aunque los percloratos son raros en la Tierra, en Marte se han detectado de forma amplia; por ejemplo, $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$ en las tierras altas del norte (Phoenix) y evidencias espectrales de percloratos asociados a las RSL ecuatoriales. Su abundancia potencial convierte a las salmueras perchloradas en los *candidatos más probables* para agua líquida actual en Marte ²² ²³.
- **Cloruros y otras sales halógenas** (ej. CaCl_2 , MgCl_2 , NaCl): Las sales cloradas comunes también bajan el punto de congelación aunque no tanto como los percloratos. Por ejemplo, una salmuera saturada de cloruro de calcio (CaCl_2) puede permanecer líquida hasta $\sim 223\text{ K}$ ($\sim -50^\circ\text{C}$), y el cloruro de sodio (NaCl , sal de mesa) hasta $\sim 252\text{ K}$ (-21°C) aproximadamente. Estas temperaturas, si bien menos extremas, siguen representando decenas de grados por debajo del punto de congelación del agua pura. En Marte, depósitos de cloruros antiguos se han identificado desde órbita en ciertas regiones, indicando que en el pasado hubo evaporación de aguas salinas. **Brines de CaCl_2** en particular se han propuesto como posibles agentes de humedecimiento del suelo: antes del hallazgo de percloratos, se especulaba que CaCl_2 del suelo marciano polar podía derretir el hielo a $\sim -50^\circ\text{C}$ en veranos, formando películas salobres. En la actualidad, se cree que los cloruros podrían contribuir a brines subsuperficiales de *moderada* depresión de congelamiento, complementando el efecto de los percloratos cuando coexisten mezclados.
- **Sulfatos, nitratos y otros**: Los sulfatos (ej. de magnesio, sodio, calcio) son abundantes en Marte (ej. yeso, epsomita) producto de la evaporación antigua. Sus soluciones salinas tienden a tener puntos de congelación más altos que los cloruros/percloratos (muchos sulfatos eutécticos están por encima de $\sim 250\text{ K}$, excepto algunos como el perclorato de sulfato doble si existiera). No obstante, la presencia de *múltiples sales en mezcla* puede llevar a **eutécticos combinados aún más bajos** (efecto antifreezing mixto). Asimismo, nitratos y cloratos detectados podrían contribuir a bajar la temperatura de congelación en menor medida. En conjunto, la geoquímica marciana ofrece un “cóctel” de sales que potencialmente empuja la estabilidad del agua hacia temperaturas muy bajas, favoreciendo salmueras líquidas.

Modificación de la evaporación y ebullición: Además del congelamiento, las sales influyen en cómo el líquido interactúa con la atmósfera. Una solución salina tiene una presión de vapor menor que el agua pura a la misma temperatura (actividad de agua < 1). En Marte esto significa que una salmuera **evapora**

más lentamente que agua pura y también hierve a mayor temperatura. Por ejemplo, en un valle profundo con 10 mbar de presión, el agua pura hierve cerca de 10°C ⁵, pero una salmuera concentrada podría soportar algunos grados más antes de hervir, gracias a la elevación ebulloscópica y a que su presión de vapor es reducida. Este efecto es modesto comparado con la depresión de congelación, pero *aún así mejora la estabilidad temporal* de líquidos expuestos. En términos prácticos, **las salmueras son más “persistentes”**: resisten la transición a vapor más que el agua pura bajo el aire seco marciano ⁵. Esto concuerda con simulaciones que muestran que, de formarse brines superficiales transitorios (p. ej. por escarcha estacional), podrían durar unas horas durante la mañana antes de secarse, a diferencia del agua pura que se perdería casi instantáneamente ²⁴ ²⁵.

Resumiendo, la presencia de sales expande la zona de habitabilidad subsuperficial de Marte tanto hacia **menores temperaturas** (permitiendo líquidos profundamente sub-cero) como hacia **bajas presiones** (reduciendo la tendencia a hervir o sublimar). Sin las sales, Marte sería aún más inhóspito para el agua líquida; con ellas, existe una *ventana termodinámica* estrecha pero no nula para que ocurran fases acuosas, sobre todo en el subsuelo protegido y a altas concentraciones salinas ¹ ⁵.

Posibles implicaciones astrobiológicas

La existencia de una zona subsuperficial con agua líquida **abre la posibilidad de hábitats para la vida** en el Marte actual. Si bien la superficie marciana es letal (radiación ultravioleta, oxidantes, desecación extrema), el subsuelo profundo podría ofrecer refugios más estables y *similares a ambientes subterráneos terrestres* donde medran microorganismos. Varias consideraciones astrobiológicas surgen al respecto:

- **Refugio de vida pasada o presente:** Muchos expertos sostienen que, si Marte alberga vida existente (extante) hoy, **lo más probable es hallarla en el subsuelo** protegido, a decenas o cientos de metros e incluso kilómetros de profundidad ²⁶. Esto se debe a que ahí podría persistir agua líquida a largo plazo, remanente de épocas más húmedas o generada por procesos geotérmicos, ofreciendo un nicho para microbios quimiolitotrofos. La hipótesis es que cualquier biota marciana primitiva, al secarse la superficie hace miles de millones de años, **habría migrado siguiendo el agua hacia capas profundas**, donde aún podría subsistir en “bolsas” acuosas aisladas (por analogía a la biosfera profunda terrestre) ²⁶. Las misiones futuras que busquen vida (ej. perforadoras o sondeos) se centran en estos ambientes subsuperficiales, ya que la probabilidad de que allí exista agua líquida y condiciones más benignas es mucho mayor que en la gélida superficie.
- **Energía y nutrientes en el subsuelo:** Un requisito para la vida es una fuente de energía utilizable. En la oscuridad del subsuelo marciano, la energía debe provenir de reacciones químicas (quimiolitotrofia). Afortunadamente, estudios recientes sugieren que **Marte profundo podría ofrecer fuentes de energía comparables a las de ecosistemas subterráneos terrestres**. Por ejemplo, la radiólisis del agua por elementos radiactivos en las rocas (U, Th, K) genera H₂ y compuestos oxidantes in situ; estos podrían sostener metabolismos similares a los de microbios reductores de sulfato en la Tierra ²⁷ ²⁸. Un modelo de 2021 mostró que las reacciones redox impulsadas solo por radiólisis podrían producir suficiente H₂ y sulfatos para mantener densidades celulares del orden de millones de microorganismos por kg de roca en el acuífero marciano, *“comparable a las observadas en muchas zonas del subsuelo terrestre”* ²⁹ ³⁰. Es decir, **donde haya agua subterránea en Marte, habría un potencial energético para la vida** casi equivalente al de ambientes análogos en nuestro planeta. Además, Marte posee minerales reactivos (p. ej. olivino, sulfuros, magnetita) que al interactuar con agua pueden liberar energía química (reacciones de serpentinización, corrosión, etc.), proporcionando otras

rutas metabólicas (metanogénesis, oxidación de hierro, etc.). Los nutrientes básicos (C, N, P) aunque escasos en Marte, podrían estar presentes en menor medida disueltos en las salmueras (CO₂ y nitratos del suelo, fosfatos de minerales). En suma, un acuífero marciano salobre y oscuro podría albergar ecosistemas quimiolitótrofos simples, análogos a comunidades de bacterias y arqueas que en la Tierra viven aisladas bajo kilómetros de roca.

- **Límites de habitabilidad por salinidad y temperatura:** A pesar de lo anterior, debe notarse que las **salmueras marcianas serían entornos extremadamente desafiantes para la vida tal como la conocemos**. La alta salinidad implica una **baja actividad de agua** (a_w): por ejemplo, una salmuera de perclorato de calcio con eutéctico a 198 K tendría $a_w \sim 0.5$ (es decir, efectivamente solo un 50% del agua está disponible a nivel químico) ³¹ ³². Ningún organismo terrestre conocido crece por debajo de $a_w \approx 0.6$; los halófilos más extremos (como ciertos hongos y arqueas halobacterias) requieren al menos ~ 0.6 – 0.61 ³³. En palabras de Chevrier y Rivera-Valentín, estas salmueras marcianas serían “*altamente inhóspitas según estándares terrestres*” ³³. Además, las temperaturas podrían estar cerca del límite mínimo de replicación biológica (en la Tierra, microbios activos se han hallado hasta $\sim 20^\circ\text{C}$ en salmueras naturales; por debajo de -40°C la actividad metabólica es prácticamente nula). Por tanto, **es posible que partes de la zona habitable subsuperficial marciana no sean habitables biológicamente**, al menos no para la vida tal cual la conocemos, por culpa de la combinación de frío extremo, hipersalinidad y quizás baja permeabilidad/nutrientes ³³ ³⁴. No obstante, no podemos descartar adaptaciones desconocidas en vida marciana. Cabe recordar que en la Antártida terrestre existen **lagos subglaciales hipersalinos** a -13°C bajo hielo (como Lago Vostok o Lago Vida) que albergan microbios especializados; estos organismos no solo toleran la salmuera, sino que algunas especies *aprovechan la sal* (iones como Cl^- , Na^+) en su metabolismo ³⁵. Es concebible que, si la vida surgió en Marte, haya tenido millones de años para adaptarse a nichos salobres en el subsuelo. Por ello, algunos científicos sugieren que **la vida marciana, de existir, podría sobrevivir incluso en salmueras frías que serían letales para la mayoría de terrestres** ³⁶.

- **Protección y detección de esa vida:** El subsuelo proporciona un formidable escudo contra la radiación cósmica y solar. A unos pocos metros de profundidad, la dosis de radiación se reduce dramáticamente, protegiendo moléculas orgánicas y células. Esto mejora la probabilidad de vida subsuperficial y también la preservación de posibles biofirmas antiguas. Por otro lado, **acceder y detectar vida tan profunda es un desafío tecnológico**. Se necesitarían perforaciones de kilómetros o métodos geofísicos avanzados (radar, sondeos eléctricos, etc.) para identificar bolsas de líquido y eventualmente muestrearlas. Misiones actuales como InSight han intentado medir propiedades del subsuelo (p.ej. el flujo de calor con el penetrómetro *HP³*), aunque con dificultades, para refinar estimaciones de la profundidad de la criósfera y posibles acuíferos. Futuras misiones podrían usar métodos indirectos (geolectricidad, gravimetría) para detectar zonas conductivas compatibles con agua salobre líquida. Desde una perspectiva de **protección planetaria**, la posibilidad de brines habitables obliga a extremar precauciones: las agencias espaciales evitan que vehículos no esterilizados contacten regiones sospechadas de tener agua, para no contaminar potenciales ecosistemas marcianos. Esto ha limitado la exploración de sitios como las RSL cercanas al ecuador o el propio lago subglacial del polo sur, considerados “regiones especiales”. Irónicamente, son las mismas zonas que más intrigan científicamente por su potencial biológico.

En conclusión, la zona de habitabilidad subsuperficial de Marte representa una franja tenue pero real en la cual convergen presión y temperatura adecuadas para el agua líquida. **La salinidad del agua amplía dicha franja**, permitiendo que salmueras existan a menor profundidad y temperatura de lo que sería posible con agua pura. Aunque estas salmueras serían ambientes extremos (fríos, hipersalinos y

oscuros), pueden ser el último reducto para la química prebiótica o la vida microbiana marciana actual. Explorar esta zona –mediante instrumentación geofísica, perforaciones o eventualmente humanos científicos in-situ– es crucial para resolver la incógnita de la habitabilidad presente de Marte. Como sugieren los investigadores, “a pesar de nuestros mejores esfuerzos por demostrar lo contrario, Marte sigue siendo un desierto frío, seco y absolutamente inhóspito” en la superficie ³⁷; pero bajo sus rocas podría persistir el *último oasis* para la vida en el planeta rojo. Las próximas décadas de exploración subsuperficial serán determinantes para descubrir si realmente “**donde hay agua (aunque sea salada), hay vida**” en Marte.

Referencias seleccionadas:

【17】 N. Hoffman (2001) “*Modern geothermal gradients on Mars and implications for subsurface liquids.*” *GeoMars Conference 2001*. (Datos de gradientes geotérmicos y estimación de profundidades para brines y agua pura en Marte ecuatorial) ¹⁴ ⁶

【19】 N. Hoffman (2001), ibid. (Cálculo de la extensión de la criósfera marciana: ~4 km en ecuador, ~5–6 km zonas templadas, >15 km en polos; efectos de terreno seco vs. saturado en hielo) ⁶ ¹⁰

【39】 S. Clifford et al. (2009) “*The Depth of the Cryosphere and the Presence of Groundwater on Present-Day Mars: Revised Estimates and Implications.*” *J. Geophys. Res.* **115**, E07001. (Revisó modelos de calor interno de Marte indicando que la criósfera podría ser hasta el doble de gruesa que estimaciones previas: ~5 km en el ecuador, hasta 12 km en polos) ⁸ ⁹

【33】 V. Chevrier & R. Slank (2024) “*The elusive nature of Martian liquid brines.*” *PNAS* **121**(52): e2321067121. (Estudio que concluye que Marte está en el límite extremo para la estabilidad de salmueras; perclorato de Ca solidifica a -75 °C y podría existir transitoriamente en subsuelo ecuatorial. Considera RSL como flujos secos y califica las salmueras como habitáculos muy poco favorables para vida terrestre) ¹ ³⁸

【48】 M. Orosei et al. (2018) “*Radar evidence of subglacial liquid water on Mars.*” *Science* **361**(6401): 490–493. (Detección de un lago subterráneo bajo el polo sur marciano mediante radar MARSIS; se discuten las condiciones de presión del hielo y alta salinidad requeridas para mantener agua líquida a ~205 K. Incluye analogías con lagos subglaciales antárticos y su biología) ¹⁸ ³⁵

【42】 L. Chevrier et al. (2009) “*Stability of perchlorate hydrates and their liquid solutions at the Phoenix landing site, Mars.*” *Geophys. Res. Lett.* **36**, L10202. (Determinación experimental/teórica de eutécticos de percloratos marcianos: ~236 K para NaClO₄ al 52% y ~206 K para Mg(ClO₄)₂ al 44%. Demuestra que los percloratos extienden el rango líquido del agua de ~198 K hasta ~296 K) ²¹

【49】 V. Chevrier (2025) “*Perchlorate brine formation from frost at the Viking 2 landing site.*” *Commun. Earth Environ.* **6**: 447. (Analiza la formación de salmueras por sublimación de escarcha estacional. Discute que a ~6 mbar el agua hierve a 0 °C, por lo que brines serían más estables en regiones de baja altitud con mayor presión; también resalta que las salmueras de Ca(ClO₄)₂ tienen a_w ~0.52. Describe limitantes para brines superficiales y su potencial habitabilidad) ⁵ ³¹

【50】 J. Tarnas et al. (2021) “*Earth-like Habitable Environments in the Subsurface of Mars.*” *Astrobiology* **21**(6): 741–756. (Modela la producción de H₂ y oxidantes por radiólisis en rocas marcianas e implica que acuíferos subsuperficiales podrían sostener comunidades de microbios quimiolitotótrofos (reductores de sulfato) con densidades similares a las de la biosfera profunda terrestre, sólo con energía de radiólisis) ²⁹ ³⁰

1 4 19 22 33 34 36 37 38 **New Study Examines Elusive Nature of Martian Liquid Brines | Sci.News**
<https://www.sci.news/space/liquid-brines-mars-13521.html>

2 17 **Large Reservoir of Liquid Water Found Deep Below the Surface of Mars | News | Astrobiology**
<https://astrobiology.nasa.gov/news/large-reservoir-of-liquid-water-found-deep-below-the-surface-of-mars/>

3 6 7 10 12 13 14 15 16 20 **ntrs.nasa.gov**
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20010089377/downloads/20010089377.pdf>

5 11 23 24 25 31 32 **Perchlorate brine formation from frost at the Viking 2 landing site | Communications Earth & Environment**
https://www.nature.com/articles/s43247-025-02411-0?error=cookies_not_supported&code=5a59ee51-a822-4423-928a-41c9edfd54f8

8 9 **The Depth of the Cryosphere and the Presence of Groundwater on Present-Day Mars: Revised Estimates and Implications. | Request PDF**
https://www.researchgate.net/publication/234336777_The_Depth_of_the_Cryosphere_and_the_Presence_of_Groundwater_on_Present-Day_Mars_Revised_Estimates_and_Implications

18 35 **Large Reservoir of Liquid Water Found Deep Below the Surface of Mars – Many Worlds**
<https://manyworlds.space/2018/07/25/large-reservoir-of-liquid-water-found-deep-below-the-surface-of-mars/>

21 **Stability of perchlorate hydrates and their liquid solutions at the ...**
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009GeoRL..3610202C>

26 **Considerations Related to Planning for the Exploration of the ...**
<http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018cosp...42E3235S/abstract>

27 28 29 30 **Earth-like Habitable Environments in the Subsurface of Mars - PubMed**
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33885329/>