

BIOLOGÍA

EUROPA: VIDA MÁS ALLÁ DE LA TIERRA

Una disertación de Astrobiología en el Sistema Solar

GRUPO 01

Balea Domínguez, Andrés - andres.balea@rai.usc.es

Ligero Portela, Sofía - sofia.ligero@rai.usc.gal

Marcos Vergara, Alejandro - alejandro.marcos@rai.usc.es

Martínez Caamaño, Pedro - pedro.martinez0@rai.usc.gal

RESUMEN

En este trabajo se discute la posibilidad de encontrar vida extraterrestre en Europa, el satélite de Júpiter, mediante un análisis de sus características geológicas, físicas y químicas, considerando previamente la definición de vida, así como su posible origen, desde una perspectiva terrestre. Considerando los datos actuales sobre este cuerpo celeste, a pesar de que existen indicios muy favorables para la biología, resulta imposible determinar si esta puede existir o no con total seguridad, ya que también parecen presentarse múltiples condiciones adversas para la vida.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	Motivación del Trabajo.....	4
1.2	Objetivos	4
2	LA VIDA.....	5
2.1	¿Qué es la vida?.....	5
2.2	Abiogénesis	5
2.3	Los Límites de la Vida.....	5
3	EUROPA, LUNA DE JÚPITER.....	6
3.1	Características Físicas	6
3.2	Características Geológicas.....	6
3.3	Características Químicas	7
4	POSIBILIDAD DE VIDA EN EUROPA.....	8
4.1	Principales Indicios.....	8
4.2	Dificultades.....	8
5	CONCLUSIONES	9
6	REFERENCIAS	10

1.1 Motivación del Trabajo

Resulta difícil concretar el momento exacto en el que los seres humanos comenzamos a plantearnos la posibilidad de que existiesen seres vivos más allá de los límites de la Tierra, bien desde un planteamiento teológico, filosófico o incluso biológico. No obstante, sí resulta posible dibujar un marco más bien definido sobre cuándo esta curiosidad dio el salto para convertirse en un campo formal y riguroso de la ciencia. En la década de 1960, el radioastrónomo Frank Drake propuso una ecuación (la ecuación de Drake) para estimar la cantidad de civilizaciones susceptibles de emitir señales de radio en la Vía Láctea. A pesar de no tener una solución actualmente, la ecuación fue aceptada por la comunidad científica como relevante debido a su carácter de primera aproximación teórica al problema. Más tarde, a partir de dicha década, se crearían numerosos proyectos SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence) como el SETI@Home, de la NASA para encontrar vida inteligente más allá de la Tierra, cimentando así las bases de la planetología y la astrobiología, siendo esta última una rama de la ciencia dedicada al estudio del inicio, desarrollo y distribución de vida a lo largo del universo, tanto dentro como fuera de la Tierra. Actualmente, el enfoque de la astrobiología persigue encontrar biomarcadores en entornos extraterrestres a través de técnicas de espectroscopía y análisis de radiofrecuencias, entre otras, mediante herramientas sofisticadas como el telescopio James Webb³ de la NASA, con el objetivo de encontrar evidencias de vida a lo largo del universo observable.

La posibilidad de hallar vida extraterrestre o, en su defecto, la ausencia de esta, no es un mero capricho de conquistar lugares más allá de nuestro planeta, sino que, en última instancia, supone una puerta hacia la comprensión de un concepto tan abstracto como la vida e incluso su origen dentro de la Tierra.

Así, en los últimos años, la lista de cuerpos celestes con posibilidad de albergar vida ha aumentado significativamente. No obstante, muchos de estos candidatos se encuentran a distancias superiores al año luz y, por consiguiente, llegar hasta ellos y estudiarlos no resulta factible en un tiempo razonable. Pese a estas aparentes limitaciones, dentro del Sistema Solar, existe un gran número de candidatos interesantes, además de la Tierra. Entre ellos destacan algunos planetas como Marte o Venus y, sobre todo, algunos satélites de los planetas más allá del cinturón de asteroides, como Titán, Encélado, Ío, Europa, etc.

De entre estos candidatos, a lo largo de este trabajo se llevará a cabo un estudio sobre Europa, el satélite de Júpiter, debido al interés de sus características geofísicas y químicas, a las investigaciones ya existentes sobre dicho entorno y motivados por la inminente misión JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) de la NASA, que recogerá datos valiosos sobre el satélite.

De este modo, a lo largo del trabajo se presentará el concepto de la vida y sus límites, junto con una descripción de las características geofísicas y químicas de Europa, explorando y justificando así la posibilidad de que exista vida o no en ese entorno.

1.2 Objetivos

Así pues, este trabajo persigue una serie de objetivos principales:

- Presentar las condiciones para existencia de la vida, tanto dentro de la Tierra, como fuera de esta.
- Plantear un candidato para la vida extraterrestre dentro del Sistema Solar.
- Determinar la posibilidad de que exista vida en ese entorno.

2.1 ¿Qué es la vida?

No existe una definición de vida ampliamente aceptada, ya que la mayoría de las definiciones propuestas se enfrentan a serias objeciones. No obstante, hay una definición de la vida que se ha convertido en influyente en la comunidad del origen de la vida: "la vida es un sistema químico autosostenido capaz de experimentar una evolución darwiniana"⁵. La noción de que "el origen de la vida es el mismo que el origen de la evolución" es un corolario popular, pero por muy valiosa que sea esta definición darwiniana para guiar los experimentos de laboratorio, es poco probable que resulte útil para una búsqueda remota de vida in situ.

En la búsqueda de vida extraterrestre dentro de nuestro sistema solar, es habitual recurrir a una noción menos ambiciosa de "la vida es la vida tal y como la conocemos", es decir, vida basada en una fuente de agua líquida, un conjunto de elementos biogénicos (principalmente carbono, pero también otros) y una fuente de energía libre. La disponibilidad de estos elementos en un mundo dado sugeriría que la vida es posible, por lo que podría justificarse una mayor explotación.

2.2 Abiogénesis

Una vez planteada la definición de vida, el siguiente paso consiste en plantearse su origen a partir de elementos inertes. Este proceso se conoce como abiogénesis² y, actualmente, las condiciones bajo las que se produjo en la Tierra resultan un tema de debate, habiendo dos hipótesis principales² como posibles candidatas.

Por un lado, ciertas evidencias apuntan a que esta producción de compuestos orgánicos a partir de elementos inertes tuvo lugar en las fuentes hidrotermales submarinas (Hipótesis de las fuentes hidrotermales), mientras que la segunda hipótesis plantea que este proceso tomó lugar en aguas termales hidrotermales superficiales (Hipótesis de las aguas termales).

Aunque las dos hipótesis parecen contradictorias, ambas plantean un origen hidrotermal de la vida y pueden resultar complementarias, ya que, por separado, presentan ciertas inconsistencias o dificultades para la formación de elementos orgánicos complejos, como membranas lipídicas.

Idealmente, conocer las condiciones bajo las que se produjo la abiogénesis en la Tierra resultaría fundamental para estimar candidatos extraterrestres aptos para la vida. No obstante, ese estudio se encuentra fuera del alcance del trabajo, con lo que se optará por emplear ambas hipótesis para justificar la posible presencia, o, en su defecto, ausencia, de vida en el entorno estudiado.

2.3 Los Límites de la Vida

Como complemento a las ideas planteadas a lo largo de esta sección, resulta interesante conocer el marco en el que se encuentran las condiciones límites para encontrar vida en la Tierra, para poder así determinar con mayor probabilidad qué entornos extraterrestres podrían ser viables. Existen numerosos trabajos de investigación al respecto, por lo que, a continuación, se recogen las condiciones límite conocidas actualmente para la presencia de organismos vivos en nuestro planeta³:

Extreme	Upper/Lower limit	Organism	Environment	Reference
Temperature	Lower limit: -18 °C	<i>Halorubrum lacusprofundi</i>	Deep Lake, Antarctica	(Cavicchioli 2006)
	Upper limit: +122 °C	<i>Methanopyrus kandleri</i>	Kairei hydrothermal field	(Takai et al. 2001, 2008)
pH	Upper limit: 12.4	<i>Alkaliphilus transvaalensis</i>	Mine water, South Africa	(Takai et al. 2001)
	Lower limit: 0	<i>Picrophilus oshimae</i>	Hydrothermal field, Hokkaido, Japan	(Schleper et al. 1996)
Salinity	Upper limit: salt saturation	All halophilic archaea	Solar salterns	(Oren 2002)
Pressure	130 Mpa at 2 °C	Isolate MT41	Deep sea amphipods	(Yayanos 1986)
Radiation	approx. 20 kGy	<i>Kineococcus radiotolerans</i> ; <i>A. pyrophilus</i> ; <i>I. hospitalis</i>	Various environments	(Bagwell et al. 2008; Beblo et al. 2011)
Heavy metals	varies with species	Various	e.g. River Tinto	(Nies 1999)
Aridity	aw 0.62	<i>Xeromyces</i>	Dry surfaces	(Leong et al. 2011)

3.1 Características Físicas

Europa es un satélite de Júpiter con núcleo estimado de hierro y níquel¹⁵, un radio de 1562,09 km¹⁸ y una gravedad en superficie de 1,3 m·s⁻²¹⁶. Su mayor exotividad se debe a ser una luna de hielo, con un albedo (fracción de radiación reflejada) medio de 0,64¹⁶ debido a su superficie de agua helada. El hielo superficial es de carácter altamente sólido gracias a las extremas temperaturas que abarcan en la superficie desde los -160 °C en el ecuador a -220 °C en los polos.

Su período orbital alrededor del gran planeta gaseoso es el mismo que el de rotación sobre sí mismo debido al sincronismo orbital en el que se acoplan por la fuerza de mareas de Júpiter; estos períodos son de 3,5 días terrestres.

Con observaciones precisas de este movimiento de rotación, se ha observado que la capa de hielo gira más rápido que su interior (teniendo esta un período de 12.000 años), el suceso se explica con la suposición de una composición líquida de agua bajo la capa de hielo superficial. Las primeras propuestas fueron formuladas en la década de 1970 y hay actual consenso en el hecho.

Mediciones electromagnéticas del satélite *Galileo*^{7 5 15} muestran la presencia de un campo magnético débil de unos 120 nT en el ecuador, inducido por Júpiter, que posibilita la existencia de una atmósfera poco densa con una presión atmosférica de unos 0,1 μPa. Esto sólo se sostiene con la presencia de una capa conductora bajo la superficie, lo cual se demuestra con la presencia de agua salada líquida bajo esta capa de hielo^{5 15}.

El estado líquido del interior de la luna ha sido estudiado y observado desde un punto energético. Su temperatura relativamente alta (entre 0 y 4 °C, de media)¹⁴ es explicada sólo desde un calentamiento subsuperficial, es decir, exento de la actividad cósmica y solar, y únicamente proveniente del interior⁵. En ello se engloba un calentamiento radiogénico^{3 14} en el que la descomposición de isótopos en el manto rocoso produce energía térmica. Esto cubre una porción no mayoritaria de este calor que se completa por la más masiva energéticamente fricción de mareas² que la gravedad de Júpiter realiza sobre las masas líquidas de agua. Se ha querido complementar esta fuente térmica con una teórica, pero aún no demostrada, producción de calor debido a maremotos causados por la atracción gravitacional de Júpiter, que formarían ondas de Rossby¹⁷.

3.2 Características Geológicas

Europa tiene una densidad de 3 g·cm⁻³ por lo que se estima que está compuesto por un núcleo de hierro (Fe) y níquel (Ni) y un manto formado por rocas silíceas⁵. Sus capas superiores serían un océano de agua líquida de unos 100 km de espesor¹⁴ y una capa de hielo de entre 10 y 30 km de grosor, sumando entre estas dos últimas unos 80 a 170 km de capa conjunta⁵ que separan el manto de la atmósfera.

En el interior, en el gran océano de en torno a 3·10¹⁸ m³ de agua (el doble que el volumen total de agua líquida de la Tierra)², se ha teorizado con la existencia de fuentes hidrotermales^{2 3} en el suelo marino. Estas fumarolas hidrotermales estarían en contacto con el manto caliente y supondrían una fuente relativamente rica de materiales y energía, alcanzando en sus alrededores unos 360 - 400 °C en el caso de fumarolas de humo negro (composición rica en sulfato de hierro (FeSO₄) principalmente) y 40 - 90 °C en el caso de las fumarolas de humo blanco (con bario (Ba), calcio (Ca) y silicio (Si)), que a su vez daría a un carácter alcalino con pH de entre 9 y 11 en las cercanías.² Según estudios, materiales provenientes del manto podrían llegar a la superficie helada por medio de burbujas³ formadas en estas fuentes hidrotermales.

La luz y energía solar, sin embargo, no alcanzaría la masa líquida de agua por la protección a radiación cósmica y solar de la gran capa de hielo. Procesos teóricos de síntesis natural de proteínas, formación de membranas o fotosíntesis son difíciles de ser realizados bajo el hielo con la ayuda de la energía solar². A no ser que se de en pequeños lagos contenidos en una zona más cercana a la superficie, pero dentro del hielo⁵, donde es a su vez más difícil debido a la escasez material (que es más abundante en el sustrato marino).

Gracias a observaciones de los satélites y sondas *Galileo*, *Voyager 1*, *Voyager 2*,^{15 16} se han notificado líneas en la superficie de hielo². Barreras de hasta 20 km de ancho formadas por la rotura y agrietamiento de la capa de hielo debido a las fuerzas de marea que recorren todo el satélite de una forma ligeramente desigual. Esto sostiene también la presencia de similares a placas tectónicas de hielo, así como una tectónica de placas débil (debido a que la resistencia es mayor a la fuerza impulsora) en el manto que se justifica también con la presencia de ciertos compuestos en la superficie provenientes del interior del manto³, así como de las también fuentes hidrotermales.

Se ha justificado de forma teórica la presencia de géiseres^{6 14} en la inmediata superficie, aunque no hay pleno consenso, diversos estudios dicen dar pruebas de ello. Esta búsqueda sigue el ejemplo de una de las lunas de Saturno, Encélado, que sí posee géiseres. Se cree que, en el caso de Europa, estos serían poco frecuentes y más comunes en el apogeo de la órbita alrededor de Júpiter debido a las corrientes marinas y presión en manto y océano más repartidas.

Una región recurrente en la superficie es la llamada zona de caos, que recubre entre el 20% y el 40% de la superficie¹⁶. Está formada por crestas y grietas entrelazadas que rompen con el estado liso de la superficie, asentadas quizás sobre lagos de agua líquida dentro del hielo; similares estos, quizás, a la estructura del lago Vostok³ en la Antártida, encontrado a 4000 metros de profundidad y en el que se han demostrado trazas de vida extremófila (se tienen en cuenta como análogas a la posible vida subsuperficial en Europa). El contacto y estabilidad es menor y menos estructurado con el entorno que rodea y se atribuyen al efecto de las fuerzas de marea de la gravedad de Júpiter, así como a un reciclaje y zona de regeneración y afloramiento subsuperficial de capas y elementos desde el interior del agua^{3 5}. De forma teórica y no demostrada se ha estimado una formación de icebergs en esas áreas. También se ha teorizado con la creación de estas zonas de caos debido a posibles impactos de cometas.

3.3 Características Químicas

Al estudiar las líneas de Europa, en su corteza de hielo, de color ligeramente rojizo, se deduce la presencia de sulfato de magnesio y/o compuestos del azufre. También se cree que puede haber compuestos orgánicos y tolina, formados por la alteración de moléculas al reaccionar debido a la radiación cósmica y ultravioleta en la superficie⁵. Estos compuestos se creen estructurados por carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H) y oxígeno (O). Estos dos últimos siendo muy comunes debido a la rotura por alta energía de radiación espacial en la atmósfera, ya que la radiación a nivel superficial es elevada, con dosis medias de radiación ionizante de 5,4 Sv (540 rem)¹⁶, que, sin la protección de la capa de hielo, imposibilitarían la vida o estabilidad orgánica a nivel superficial. El papel de los dichos compuestos es, en sí mismo, crucial en la química prebiótica y en la abiogénesis. También se sospecha de presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4)²⁰ en menor medida, al ser cubierta su fórmula en espectrogramas, este, al igual que otros químicos, es incoloro y no se apreciaría de forma directa en la superficie. Bajo esta superficie, en el océano, se deducen niveles bajos pero existentes, sobre todo en el suelo marino, de fósforo (P)². También, gracias a la interacción con el manto mediante fumarolas, habría presencia de iones de sodio (Na)^{2 3}, cloro (Cl) y carbonatos que podrían dificultar la supuesta formación de protocélulas si sus membranas de bicapa lipídica no se pudiesen ensamblar de forma aislada al medio comentado². Esta actividad sería aún menos probable en los comienzos del océano satelital, ya que se estima que fue ácido.

También se puede estudiar la composición interna del océano o del manto gracias a las regiones de caos, ya que comunican y permiten el intercambio elemental y molecular. De esta manera se ha registrado cloruro de sodio (NaCl)² en los océanos, al ser medido en el espectro de absorción de 450 nm¹⁶, lo cual confirma la suposición teórica de sal en estas masas de agua, como conductor que genera la magnetosfera inducida. En esta zona de caos, también se han observado recientemente, a través del telescopio James Webb^{6 13}, trazas de carbono, pero sólo en las regiones de caos. Pese a ser este un tema de discusión actual, se hipotetiza una posible procedencia del interior del océano.

En lo que respecta a la atmósfera, mencionada con anterioridad, débil y poco espesa, sostenida y protegida de los vientos solares gracias a su débil magnetosfera y a la de Júpiter, es relativamente delgada, llegando a contener, de forma medianamente estable, oxígeno hasta una distancia de unos 190 km de la superficie¹⁹. La atmósfera estaría compuesta principalmente de este elemento y, en menor medida, vapor de agua (H_2O) y carbono en las zonas de caos. El oxígeno provendría de la interacción de partículas de agua con radiación exterior y choque de partículas cargadas de la magnetosfera^{16 19}. El oxígeno permanecería mientras que el hidrógeno, por su baja densidad, se irradiaría al espacio.

Debido a las extremadamente bajas temperaturas y a la baja presión y escaso espesor, no podrían observarse nubes ni vientos significativos, por lo que se apreciaría un cielo carente de color y transparente al espacio exterior¹⁶.

4 POSIBILIDAD DE VIDA EN EUROPA

4.1 Principales Indicios

Las características físicas, geológicas y químicas del satélite, presentadas en la sección anterior, parecen plantear posibles indicios de un entorno apto para la vida tal y como la conocemos.

Atendiendo a la primera hipótesis de la abiogénesis, parece que la estimada existencia de fuentes hidrotermales y la composición química del lecho oceánico de Europa podrían prestarse a formar moléculas orgánicas complejas en forma de organismos unicelulares simples, si bien, la formación de sus membranas lipídicas resultaría complicada, tal y como predicen los detractores de dicha hipótesis, debido a que los lípidos anfipáticos, por naturaleza, sólo parecen unirse en forma de vesículas membranosas en la presencia de agua dulce. No obstante, recientes estudios plantean que estas vesículas también pueden conformarse mediante reacciones de síntesis Fischer-Tropsch en presencia de agua alcalina y temperaturas relativamente altas⁶, condiciones que se encuentran presentes en las fumarolas blancas, cuya presencia es teorizada en Europa.

Adicionalmente, mediante una comparación directa con un entorno terrestre de condiciones similares, en este caso, el lago Vostok³, resulta posible plantearse la existencia de organismos vivos en los teorizados lagos subsuperficiales de Europa, presentes dentro de la capa de hielo exterior.

Por último, las condiciones ambientales estimadas del océano interior de Europa parecen ser aptas para la existencia de hipotéticos organismos vivos, atendiendo a los límites conocidos para la vida en la Tierra.

4.2 Dificultades

Pese a los posibles indicios de vida discutidos, Europa carece de una serie de factores ambientales fundamentales para la vida tal y como la conocemos en la Tierra, puesto que su atmósfera es muy débil, y sus temperaturas exteriores, muy frías, debido a su distancia al Sol, lo que parece implicar la ausencia de organismos fotosintéticos y, por consiguiente, autótrofos, hecho que resulta en la imposibilidad de aparición de redes tróficas análogas a la de la Tierra.

Otra consideración de importancia significativa que podría dificultar la formación de la vida en Europa es la presencia de oxígeno en el satélite, puesto que la elevada reactividad química de este elemento implica una dificultad añadida para la formación y estabilidad de las posibles formas de vida primitivas, de forma similar a lo que sucedió durante la extinción de la Gran Oxidación del Paleoproterozoico en nuestro planeta. Sin embargo, pese a dificultar el comienzo de la vida, no tendría que suponer un problema si esta se adaptase de forma previa o paralela a la presencia de dicho elemento. Actualmente se desconoce la naturaleza del oxígeno en Europa, así como la formación de organismos replicables en base a este. También cabe mencionar que la presencia de oxígeno disuelto en el océano es aún un misterio, así como su posible concentración. No obstante, aunque la presencia del elemento ha sido únicamente confirmada en la atmósfera, todo parece apuntar a que, en caso de estar presente en el agua, sería en niveles muy bajos en la región en contacto con el manto¹⁵.

Otra posible dificultad para la abiogénesis en Europa se encuentra en la posibilidad de que no existan placas tectónicas y las mediciones de posibles fuentes hidrotermales en el manto del satélite sean erróneas.

Por último, es importante mencionar que aún no ha habido una misión espacial específica para investigar Europa y que los datos actuales tienen un nivel de interpretación elevado, puesto que muchas de las tecnologías empleadas para adquirir los datos del satélite no están diseñadas para esta labor.

Pese a las herramientas sofisticadas de exploración espacial actuales y a la aparente cercanía de los demás cuerpos celestes del Sistema Solar a la Tierra, determinar la posible presencia de biomarcadores en estos entornos resulta especialmente complicado.

Aún con esta dificultad y sin una descripción objetiva de la vida, ni siquiera para la que existe tal y como la conocemos en la Tierra, es posible teorizar sobre entornos extraterrestres a partir de los conocimientos que poseemos actualmente, en última instancia, mediante comparaciones con nuestro planeta.

Empleando este último planteamiento, resulta complicado encontrar candidatos dentro del Sistema Solar que pudiesen soportar la biología basada en el carbono al igual que la Tierra, ya que, aunque en el caso de Europa, el satélite de Júpiter, y otros satélites o planetas, existan ciertas condiciones favorables para la vida, en ningún cuerpo celeste de nuestro sistema parecen cumplirse todas las condiciones aparentemente necesarias.

1. Carré, L., Zaccai, G., Delfosse, X., Girard, E., & Franzetti, B. (2022). Relevance of Earth-Bound Extremophiles in the Search for Extraterrestrial Life. *HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe)*, 22(3), 322–367. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0033>.
2. Longo, A. Z., & Damer, B. (2020). Factoring Origin of Life Hypotheses into the Search for Life in the Solar System and Beyond. *Life*, 10(5), 52. <https://doi.org/10.3390/life10050052>
3. Cottin, H., Kotler, J. M., Bartik, K., Cleaves, H. J., Cockell, C. S., De Vera, J. P. P., Ehrenfreund, P., Leuko, S., Kate, I. L. T., Martins, Z., Pascal, R., Quinn, R. C., Rettberg, P., & Westall, F. (2015). Astrobiology and the possibility of life on Earth and elsewhere. . . *Space Science Reviews*, 209(1–4), 1–42. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0196-1>
4. Benner, S. A. (2017). Detecting Darwinism from Molecules in the Enceladus Plumes, Jupiter's Moons, and Other Planetary Water Lagoons. *Astrobiology*, 17(9), 840–851. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1611>
5. Chyba, C. F., & Phillips, C. B. (2001). Possible ecosystems and the search for life on Europa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(3), 801–804. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.3.801>
6. Team, N. W. T. (2023, September 27). NASA's Webb finds carbon source on surface of Jupiter's Moon Europa. NASA. <https://www.nasa.gov/solar-system/nasas-webb-finds-carbon-source-on-surface-of-jupiters-moon-europa/>
7. Roth, L. (2021). A Stable H₂O Atmosphere on Europa's Trailing Hemisphere From HST Images. *Geophysical Research Letters*, 48(20). <https://doi.org/10.1029/2021gl094289>
8. Bagenal, F., & Dols, V. (2020). The space environment of IO and Europa. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(5). <https://doi.org/10.1029/2019ja027485>
9. Roth, L. (2021b). A Stable H₂O Atmosphere on Europa's Trailing Hemisphere From HST Images. *Geophysical Research Letters*, 48(20). <https://doi.org/10.1029/2021gl094289>
10. Ashkenazy, Y. (2019). The surface temperature of Europa. *Heliyon*, 5(6), e01908. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01908>
11. Europa Lander Engine Plume Interactions with the Surface and Vehicle. (2020, March 1). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9172679>
12. Riveiro, A. (2019). ¿Por qué se buscan planetas como la Tierra? *Astrobitácora*. <https://www.astrobitacora.com/por-que-se-buscan-planetas-como-la-tierra/>
13. Trumbo, S. K., & Brown, M. E. (2023). The distribution of CO₂ on Europa indicates an internal source of carbon. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 381(6664), 1308–1311. <https://doi.org/10.1126/science.adg4155>
14. Melosh, H. J., Ekholm, A. G., Showman, A. P., & Lorenz, R. D. (2004). The temperature of Europa's subsurface water ocean. *Icarus (New York, N.Y. 1962)*, 168(2), 498–502. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2003.11.026>

15. Kivelson, M. G., Khurana, K. K., Russell, C. T., Volwerk, M., Walker, R. J., & Zimmer, C. (2000). Galileo Magnetometer measurements: a stronger case for a subsurface ocean at Europa. *Science*, 289(5483), 1340-1343. <https://doi.org/10.1126/science.289.5483.1340>
16. Wikipedia contributors. (2023, 21 noviembre). *Europa (Moon)*. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Europa_\(moon\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Europa_(moon))
17. TYLER, R. H. (2008). Strong ocean tidal flow and heating on moons of the outer planets. *Nature*, 456(7223), 770–772. <https://doi.org/10.1038/nature07571>
18. *Europa Voyager / Galileo Global Image Mosaic Map* | USGS Astrogeology Science Center. (s. f.). https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Europa/Mosaic/europa_map
19. Smith, H. T., Mitchell, D. G., Johnson, R. E., Mauk, B. H., & Smith, J. E. (2019). Europa Neutral Torus confirmation and characterization based on observations and modeling. *The Astrophysical Journal*, 871(1), 69. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaed38>
20. Carlson, R. W., Anderson, M. S., Mehlman, R., & Johnson, R. E. (2005). Distribution of hydrate on Europa: Further evidence for sulfuric acid hydrate. *Icarus* (New York, N.Y. 1962), 177(2), 461–471. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.03.026>