

**JUNIO
SUPLEMENTO
2025**



MAYA

REVISTA DE GEOCIENCIAS





MAYA

REVISTA DE GEOCIENCIAS

Revista Maya: Revista Maya de Geociencias que (RMG) nace del entusiasmo de profesionistas con la inquietud de difundir conocimientos relacionados con la academia, investigación, la exploración petrolera y Ciencias de la Tierra en general.

El objetivo principal de la revista es proporcionar un espacio a todos aquellos jóvenes profesionistas que deseen dar a conocer sus publicaciones. los fundadores de la revista son *Luis Angel Valencia Flores, Bernardo García Amador y Claudio Bartolini.*

Otro de los objetivos de la Revista Maya de Geociencias es incentivar a profesionales, académicos, e investigadores, a participar activamente en beneficio de nuestra comunidad joven de geociencias.

La Revista tendrá una publicación mensual, por medio de un archivo PDF, el cuál será distribuido por correo electrónico y compartido en las redes sociales. Esta revista digital no tiene fines de lucro. La RMG es internacional y bilingüe. Si desear participar o contribuir con algún manuscrito, por favor comuníquese con cualquiera de los editores.

Las notas geológicas tienen como objetivo el presentar síntesis de trabajos realizados en México y en diferentes partes del mundo por jóvenes profesionales y prestigiosos geocientíficos. Son notas esencialmente de divulgación, con resultados y conocimientos nuevos, en beneficio de nuestra comunidad de geociencias. Estas notas no están sujetas a arbitraje.

**Es importante aclarar, que las opiniones científicas, comerciales, culturales, sociales etc., no son responsabilidad, ni son compartidas o rechazadas, por los editores de la revista.*

Portada de la revista: This is part of the Mt Blanc Massif as seen from the Ermitage, a restaurant above the town of Courmayeur, Italy. Forming the border between Italy and France, the Mt Blanc massif covers ~350 km² (135 mi²) and reaches an elevation of 4,808 m (15,774 ft), the highest point in the Alps and in all of western Europe. Mont Blanc is mainly a granitic batholith (~303 Ma) and associated rhyolites formed during the Late Carboniferous (Pennsylvanian) Variscan Orogeny. Photo by **Dr. Gary Prost.**

Revista Maya: The Revista Maya de Geociencias (RMG) springs from the enthusiasm of professionals with a desire to distribute knowledge related to academic research, exploration for resources and geoscience in general.

The main objective of the RMG is to provide a place for young professionals who wish to distribute their publications. The founders of the Revista are Luis Ángel Valencia Flores, Bernardo García and Claudio Bartolini.

A further objective of the RMG is to encourage professionals, academicians and researchers to actively participate for the benefit of our community of young geoscientists.

The RMG is published monthly as a PDF file distributed by email and shared through social media. This digital magazine has no commercial aim. It is international and bilingual (Spanish and English). If one wishes to participate or contribute a manuscript, please contact any of the editors.

The geological notes aim to synthesize work carried out in Mexico and other parts of the world both by young professionals and prestigious geoscientists. These notes are produced principally to reveal new understandings for the benefit of our geoscientific community and are not subjected to peer review.

Revista de difusión y
divulgación geocientífica.

EDITORES



Luis Angel Valencia Flores (M.C.). Ingeniero Geólogo y Maestro en Ciencias en Geología, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura-Unidad Ticomán. Ha trabajado en el IMP, Pemex Activo Integral Litoral de Tabasco, Schlumberger, Paradigm Geophysical, Comisión Nacional de Hidrocarburos, Aspect Energy Holdings LLC, actualmente es académico del IPN (posgrado y licenciatura) y la UNAM (licenciatura) impartiendo las materias de Evaluación de formaciones, Caracterización de yacimientos, Geología de yacimientos, Geoquímica, entre otras del ramo petrolero. Cuenta con experiencia de 20 años trabajando en diversos proyectos de

planeación y perforación de campos, pozos costa afuera, petrofísica, geomodelado y caracterización de yacimientos entre ellos: Cantarell, Sihil, Xanab, Yaxche, Sinan, Bolontiku, May, Onixma, Faja de oro, campos de Brasil, Bolivia y Cuba. Como Director General Adjunto en la CNH fue parte del equipo editor técnico en la generación de los Atlas de las Cuencas de México, participó como ponente del Gobierno de México en eventos petroleros de Canadá, Inglaterra y Estados Unidos. Es Technical Advisor del Capítulo estudiantil de la AAPG-IPN.

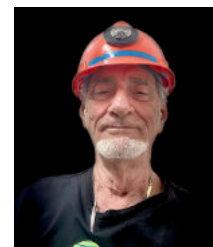
luis.valencia.11@outlook.com



Bernardo García-Amador obtuvo su doctorado en Ciencias de la Tierra por la UNAM en 2024. Su pasión es entender la evolución tectónica de Centroamérica, así como del sur y este de México antes, durante y posterior a la fragmentación de Pangea. Además imparte el curso de tectónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Bernardo ha

publicado parte de su trabajo de doctorado en las revistas Tectonics y Tectonophysics, además de ser coautor de otros artículos científicos de distintos proyectos.

bernardo.garcia@ingenieria.unam.edu



Josh Rosenfeld (Ph.D.). He obtained an M.A. from the University of Miami in 1978, and a Ph.D. from Binghamton University in 1981. Josh joined Amoco Production Company as a petroleum geologist working from 1980 to 1999 in Houston, Mexico and Colombia. Upon retiring from Amoco, Josh was employed by Veritas DGC until 2002 on

exploration projects in Mexico. He has been a member of HGS since 1980 and AAPG since 1981, and currently does geology from his home in Granbury, Texas.

jhrosenfeld@gmail.com



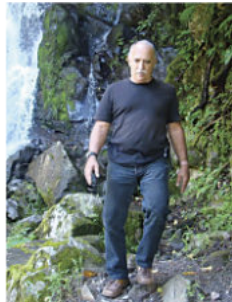
Claudio Bartolini (Ph.D.) is presently a senior exploration advisor at Petroleum Exploration Consultants Americas. He has more than 25 years of experience in both domestic and international mining and petroleum exploration, mainly in the United States and Latin America. Claudio was an associate editor for the AAPG Bulletin and he has edited several books on the petroleum geology of

the Americas. He is a Correspondent member of the Academy of Engineering of Mexico.

Claudio was made an Honorary Member of the AAPG in 2022 in recognition of his service to the Association, and his devotion to the science and profession of petroleum geology.

bartolini.claudio@gmail.com

COLABORADORES



Ing. Humberto Álvarez Sánchez. Más de 5 décadas dedicadas a la geología de Cuba occidental y central. Cartógrafo en los macizos metamórficos y ofiolíticos de Cuba central y editor cubano de la Expedición checoslovaca Escambray II. Autor/coautor de 23 unidades del Léxico Estratigráfico de Cuba y miembro de las subcomisiones del Jurásico, Cretácico y Paleógeno de la Comisión del Léxico. Es el descubridor del mayor depósito cubano de fosforitas marinas. Gerente de Operaciones de Geotec, S.A.; dirigió exploraciones de Cu y Au en la Cordillera Central de Panamá y Perú para Juniors canadienses. Country Manager de Big Pony Gold de Utah y Geólogo Senior de Gold Standard Brasil, exploró prospectos de oro en el basamento cristalino de Uruguay y en los Estados de Santa Catarina y Mato



Ramón López Jiménez es un geólogo con 14 años de experiencia en investigación y en varios sectores de la industria y servicios públicos. Es un especialista en obtención de datos en campo, su análisis y su conversión a diversos productos finales. Ha trabajado en EEUU, Mexico, Colombia, Reino Unido, Turquía y España. Su especialidad es la sedimentología marina de aguas profundas. Actualmente realiza investigación en



José Antonio Rodríguez Arteaga es Ingeniero geólogo, egresado de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela, Caracas, con más de 30 años de experiencia. En sus inicios profesionales laboró como geólogo de campo por 5 años consecutivos en prospección de yacimientos minerales no-metálicos de la región Centro-Occidental de Venezuela. Tiene en su haber labores de investigación en Geología de Terremotos y Riesgo Geológico asociado o no a la sismicidad. Es especialista en Sismología Histórica, Historia de la Sismología y Geología venezolanas. Ha recibido entrenamiento profesional en

Grosso del Norte. El Ministro de Comercio e Industrias lo nombró Miembro de la Comisión "Ad Honorem" del Plan Maestro de Minería de Panamá. El Banco Interamericano de Desarrollo le encargó de redactar el Proyecto de Geología y Minería y parte de su Misión Especial para su entrega al Gobierno panameño. Anterior Miembro del Consejo Científico de GWL de la Federación Rusa y Representante del BGS en América central. Director de Miramar Mining Panamá y Minera Santeña, S. A., reside en Panamá y redacta obras sobre geología de Cuba y Panamá. En el repositorio Academia edu, se encuentran 22 artículos suyos.

geodoxo@gmail.com

afloramientos antiguos de aguas someras y profundas de México, Turquía y Marruecos en colaboración con entidades públicas y privadas de esos países. Es instructor de cursos de campo y oficina en arquitectura de yacimientos de aguas profundas y tectónica salina por debajo de la resolución sísmica.

r.lopez.jimenez00@aberdeen.ac.uk

Metalogenia, Ecuador y Geomática Aplicada a la Zonificación de Riesgos en Colombia. Tiene en su haber como autor y coautor, tres libros dedicados a la catalogación sismológica del siglo XX; a la historia del pensamiento sismológico venezolano y la coordinación de un atlas geológico de la región central del país, preparado junto al Dr. Franco Urbani, profesor por más de 50 años de la Escuela de Geología de la Universidad Central. Actualmente prepara un cuarto texto sobre los estudios de un inquieto naturalista alemán del siglo XIX y sus informes para los terremotos destructores en Venezuela de los años 1812, 1894 y 1900.

rodriguez.arteaga@gmail.com



Natalia Silva (MSc): Geóloga de la Universidad Industrial de Santander, Postgrado en Petroleum Geoscience de la Heriot-Watt University y Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética de la Universitat de Barcelona. Su carrera empieza en la minería de esmeraldas en el Cinturón Esmeraldífero Oriental de Colombia y en proyectos mineros de Níquel colombianos. Tiene más de 10 años de experiencia en el sector de hidrocarburos en desarrollo de

yacimientos y geomodelado en cuencas petrolíferas de los Estados Unidos, Colombia, Ecuador y Brasil. Más recientemente, su carrera está enfocada en el aprovechamiento de energías renovables, principalmente de energía solar, ha elaborado proyectos de generación eléctrica a partir de instalaciones fotovoltaicas en Europa y los Estados Unidos.

ensilvacruz@gmail.com



Miguel Vazquez Diego Gabriel, es estudiante de la carrera de Ingeniería Geológica en la Universidad Nacional Autónoma de México (Facultad de Ingeniera), sus principales áreas de interés a lo largo de la carrera han sido la tectónica, geoquímica y mineralogía. Es un

entusiasta de la divulgación científica, sobre todo en el área de las Ciencias de la Tierra.

diegogabriel807@gmail.com



Daniela Kristell Calvo-Ramos es Ing. Ambiental de la Univ. Politécnica de Chiapas, Maestría y Doctorado en Ciencias de la Energía en la Univ. Autónoma de Querétaro. Actualmente en estancia Posdoctoral en Centro de Geociencias UNAM-Juriquilla. Sus líneas prioritarias de investigación son: (1) síntesis de materiales fotocatalíticos, (2) síntesis de materiales grafénicos, (3) fotodegradación de colorantes en aguas, (4) foto-oxidorreducción de metales en agua y (5) contaminación de metales en agua. En su programa posdoctoral está

trabajando en preparación de muestras (separación en columnas de intercambio iónico) y análisis (Espectrometría de Masas Multicolector con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MMS) para medición de isótopos estables de zinc, cobre y hierro en diferentes materiales naturales (agua-roca). También es docente en la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES-UNAM Juriquilla).

dcalvo@geociencias.unam.mx



Rafael Tenreiro Pérez, se gradúa de ingeniero en geofísica de exploración de petróleo en 1974 en la Academia Estatal de Petróleo de Azerbaiyán, Master en Ciencias en Geología del Petróleo en la Universidad Politécnica CUJAE de la Habana en 1981 y Doctor en ciencias en Geofísica de Exploración la Universidad de Petróleo Gubkin de Moscú, Rusia, en 1987.

Tiene cuarenta y ocho años de experiencia en la Industria petrolera en Cuba y en otros países fundamentalmente en la especialidad de exploración de yacimientos de petróleo y gas. Durante este tiempo transitó desde ingeniero geofísico de adquisición hasta

Jefe de Exploración de la empresa petrolera nacional de Cuba - Cupet, cargo que ocupó por 16 años hasta su retiro en 2016. Investigador científico también recorre desde Aspirante a Investigador a Investigador Titular. Fue Jefe técnico del programa de exploración en la Zona Económica Exclusiva del Golfo de México. Director Técnico del Comisión para la Plataforma Extendida de Cuba. Tiene más de doscientas publicaciones que incluyen artículos científicos, presentaciones en eventos, conferencias, mapas, monografías y libros de texto. Premio de Geología Antonio Calvache Dorado de la Sociedad Cubana de Geología en 1992. En estos momentos trabaja en la empresa australiana Melbana Energy Limited.

tenreiro2015@gmail.com

Lazos de colaboración y amistad con la **AAPG**

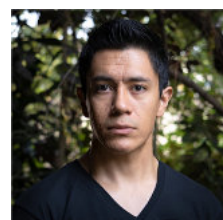


Laura Itzel González León / Ingeniera geóloga ambiental

Profesionista inclinada a la Geología aplicada a obras de ingeniería civil y a riesgos geológicos desencadenados por fenómenos antrópicos y naturales. Experiencia en

levantamientos geológico-estructurales, logueo geológico, instrumentación geotécnica, cartografía de riesgos, supervisión de perforaciones y difusión de geopatrimonio.

gleon.laura@gmail.com



Rodolfo Rafael Avalos Alejandre Es ingeniero geólogo por la Facultad de Ingeniería (2022), actualmente estudiante de la maestría en ciencias de la Tierra por el Instituto de Geociencias. Realizó su estancia profesional en la unidad minera Fresnillo (2019), yacimiento correspondiente con su trabajo de tesis. Su principal interés es el entender procesos geológicos de escala regional enfocados en la exploración de yacimientos minerales a partir

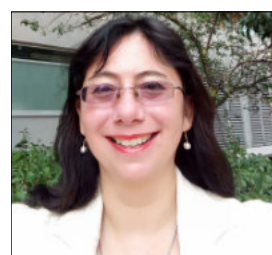
de análisis de Mineralogía Avanzada, estudiando variaciones en especies minerales, texturas, asociaciones, grados de cristalinidad, emulsiones por exsolución y elementos menores en solución sólida. Es divulgador científico centrado en la astronomía, historia de la ciencia y cultura desde 2015 en la plataforma Astro Camp MX, montañista entusiasta desde 2021 y fotógrafo de paisaje desde 2021.

r.avalos@astrocamp.mx



Dr. Alejandro Carrillo-Chávez. Ingeniero Geólogo del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en La Universidad de Cincinnati, y Doctorado en la Universidad de Wyoming. Inició su trabajo en el Instituto Mexicano del Petroleo y después inició vida académica en la Universidad Autónoma de Baja California Sur. En 1998 ingresó al a Unidad Investigación en Ciencias de la Tierra (UNICIT) UNAM, Campus Juriquilla (actual Centro de Geociencias). Su trabajo inicial fue sobre petrografía ígnea y metamórfica. En academia inició dando clases de petrología ígnea y metamórfica.

Actualmente es Tutor del Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM. Su maestría fue sobre yacimientos minerales metálicos y su doctorado sobre geoquímica ambiental. Actualmente sus líneas de investigación son: Metales Pesados en Medio Ambiente, Hidrogeoquímica, Geoquímica Isotópica de Metales Pesados e Hidrogeoquímica de Salmueras Petroleras. A la fecha es responsable de un Proyecto UNAM y CONAHcyT sobre Concentraciones de metales e isotopía estable de Zn y Hg en agua de lluvia, nieve y núcleos de hielo en glaciares mexicanos. ambiente@geociencias.unam.mx



La **Dra. Norma E. Olvera Fuentes**, estudió la carrera de Física en la Facultad de Ciencias, su Maestría en el Instituto de Física y su Doctorado en Ciencias de la Tierra, en el ICAyCC, UNAM. Sus líneas de investigación tanto en licenciatura como en maestría versaron sobre el problema cuántico de difracción espacio-temporal de Moshinsky para diversas geometrías.

Bajo la dirección del Dr. Carlos Gay, su investigación doctoral analizó por medio del uso de mapas cognitivos difusos los posibles impactos que el cambio climático puede tener sobre la vulnerabilidad hídrica de la ZMVM. Su tesis doctoral fue galardonada con el Primer Lugar del Primer Premio a la Investigación en Cambio Climático PINCC-UNAM, 2023.

Con casi 20 años de labor docente, ha impartido clases en la Facultad de Ciencias y en la Facultad

de Ingeniería de la UNAM, así como en la División de Ingeniería del Tecnológico de Monterrey, Campus Santa Fe. Institución que le otorgó la Presea por Excelencia Académica como profesora de Cátedra. Como escritora tiene publicados tres libros como única autora y 5 como coautora. El número de Impluvium Gestión Integral de Sequías, en el que el Dr. Gay y la Dra. Olvera son coautores de artículo, es referencia de consulta que el CENAPRED presento para su curso "Sequías: un reto en la reducción del riesgo", marzo del 2024.

Actualmente la Dra. Olvera es Investigadora Posdoctoral del Instituto de Ingeniería de la UNAM, miembro del Sistema Nacional de Investigadores e invitada como líder de opinión del periódico Excelsior.

norma.olvera@atmosfera.unam.mx



Nuevo Canal Youtube de la Revista Maya de Geociencias

Es un gran placer informarles que hemos establecido un Canal Youtube de nuestra Revista Maya para la difusión de videos de temas de Ciencias de la Tierra. Ya iniciamos nuestras actividades en: <https://www.youtube.com/channel/UCYJ94EyLj4LqnVbbTXh5vpA>

Estimados colegas,

Te invitamos a que visites la página web de nuestra Revista Maya de Geociencias, donde podrán encontrar (en formato PDF), todas las revistas que hemos publicado hasta ahora, mismas que pueden descargar de la página. También estaremos incluyendo información adicional que sea de utilidad para nuestras comunidades de geociencias.

<http://www.revistamaya.com/>



Visítanos en Revista Maya de Geociencias

<https://www.facebook.com/groups/430159417618680>



Tertiary mylonites, Catalinas metamorphic core complex, Tucson, Arizona. Photo by Claudio Bartolini.

Estimados Colegas

Ahora que hemos llamado su atención, aprovechamos la oportunidad para invitarlos cordialmente a participar en nuestra Revista Maya de Geociencias, con diversos Temas de Interés y Manuscritos Cortos relacionados a cualquier tema de las Ciencias de la Tierra y similares. Todos los trabajos son bienvenidos, puesto que la función primordial de la revista es la difusión de las geociencias.

Si los manuscritos son relativamente largos, también pueden ser publicados, pero en nuestras Ediciones Especiales de la revista, las cuales no tienen las limitaciones de tamaño, como los números mensuales de la revista.

*Nuestro agradecimiento a **Manuel Arribas Andrés**, un gran fotógrafo y excelente diseñador gráfico Español, por la creación del nuevo logotipo de la Revista Maya de Geociencias y sus indicaciones para la compaginación de la misma.*

Manuel Arribas Andrés. Fotógrafo de España: <https://www.instagram.com/manuel.arribas.andres/>

EDICIÓN ESPECIAL XXIII



TABLA DE CONTENIDOS

Hidrógeno, perspectivas de almacenamiento subterráneo

Moisés Dávila Serrano, Cristian Martín Amezcua Meléndez

Geomitología

Jhonny E. Casas

El valor didáctico del patrimonio geológico en la carrera de ingeniería geológica

Yaritza Aldana Aldana Rafael Miguel Guardado Lacaba, Felipe Enio Robas Díaz

Tiempo geológico y tiempo humano; el Tiempo del Universo y el Tiempo de la consciencia

Salvador Ortuño Arzate



Prince Christian Fjord in Greenland. It shows a recumbent fold in the metamorphic rocks with some puzzling faulting. Photo by Joshua Rosenfeld.

Esteemed colleagues

Now that we have your attention, we take this opportunity to cordially invite your participation in the Revista Maya de Geociencias in the form of short manuscripts touching upon diverse relevant themes of interest. All work is welcome, as the primary function of the magazine is to broadcast geoscientific ideas.

If the manuscripts are relatively long, they will be published in our magazine's Special Editions since the Special Editions do not have size limitations, as do our monthly issues (below).

Basic Instructions for Authors

Authors submitting material to be published in the Revista Maya de Geociencias are asked to adhere to the following editorial guidelines when sending manuscripts to the editing team and/or its collaborators:

(biographical sketches): a maximum of 3 pages

Notes on pioneers in the geosciences: a maximum of 4 pages

Themes "of interest to the community": a maximum of 4 pages

Geological notes: a maximum of 10 pages

Hidrógeno, perspectivas de almacenamiento subterráneo

Moisés Dávila Serrano, Cristian Martín Amezcua Meléndez

División de Ingeniería en Ciencia de la Tierra, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México

INTRODUCCIÓN

El hidrógeno es el primer elemento químico de la tabla periódica. Es el más ligero pues su estructura es la más simple, pero de ninguna manera es el elemento más sencillo. Cuenta tan solo con un protón en su núcleo lo cual le confiere el número atómico uno (1) y tiene también un electrón orbitando fuera de su núcleo. Su molécula estable se compone de dos átomos por lo que se representa como H₂. Es el elemento más abundante del universo, casi el 75%. En la Tierra también abunda, aunque generalmente se le encuentra unido a otros elementos, como el oxígeno.

El hidrógeno no es solamente el número uno de la lista de los elementos químicos, además posee múltiples características que lo convierten en el principal combustible del universo. Tiene la mayor densidad de energía gravimétrica de todas las sustancias conocidas (120 kJ/g), pero la masa atómica más baja de cualquier materia (1,00784 u)¹ y como tal tiene una densidad de energía volumétrica baja. Para mejorar su relación volumen/densidad de energía, al hidrógeno se le almacena como moléculas de sustancias líquidas, como portadores de hidrógeno orgánico líquido. O portadores de hidrógeno directamente utilizables como el amoníaco o metanol (Abdin, 2021). Sin embargo, licuar hidrógeno conlleva un costo importante, uno de sus principales inconvenientes para utilizarlo intensivamente en la actualidad. En el corto plazo es poco probable que sea económico licuarlo en cantidades a escala de almacenamiento masivo (Yin, 2020). Por su pequeño peso molecular, baja viscosidad, baja densidad y flotabilidad positiva por encima de -251°C, el gas hidrógeno es altamente difusivo². Tiene una baja solubilidad en agua; sin embargo, se ha demostrado que su solubilidad aumenta al aumentar la presión (Chabab, 2020). Algunos otros parámetros de interés se presentan en las figuras 1 y 2, en donde se le compara con el metano y el bióxido de carbono para mejor referencia.

Propiedades	H ₂	CH ₄	CO ₂
Peso molecular	2.016	16.043	44.09
Densidad a 25 °C y 1 atm	0.089 kg/m ³	0.657 kg/m ³	1.98 kg/m ³
Viscosidad a 25 °C y 1 atm	0.89 x 10 ⁻⁴ Pa s	1.1 x 10 ⁻⁴ Pa s	1.49 x 10 ⁻⁴ Pa s
Solubilidad en agua a 25 °C y 1 atm	16 x 10 ⁻⁴ g/L	22.7 x 10 ⁻⁴ g/L	1.45 x 10 ⁻⁴ g/L
Punto de ebullición	-253 °C	-162 °C	-78.44 °C
Temperatura crítica	-239.95 °C	-82.3 °C	-31 °C
Presión crítica	12.8 atm	45.79 atm	72.79 atm
Rango de valor calorífico	120-142 kJ/g	50-55.5 kJ/g	-
Difusión en agua a 25 °C y 1 atm	5.13 x 10 ⁻⁹ m ² /s	1.85 x 10 ⁻⁹ m ² /s	1.60 x 10 ⁻⁹ m ² /s
Punto de inflamabilidad	-253 °C	-188 °C	-
Rango de inflamabilidad	4-75 °C	5-15 °C	-
Número de octanaje en la investigación (RON)	>130	125	-
Temperatura de autoignición	585 °C	540 °C	-

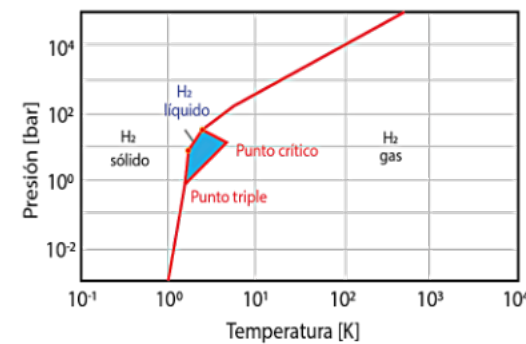
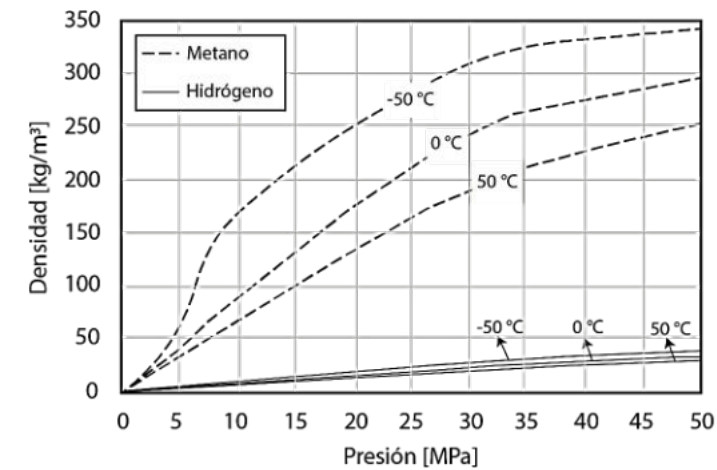


Figura 1. Diagrama de fase del H₂ y principales propiedades fisicoquímicas comparando con CH₄ y CO₂. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022).

¹ u significa unidad de masa atómica (uma) o Dalton (Da) y corresponde a la unidad común para expresar la masa atómica de átomos y moléculas. 1u = 1/12 de la masa de un átomo de carbono-12. Por ejemplo, la uma del oxígeno (16 u) corresponde a 16 veces 1/12 de la masa de un átomo de carbono-12. Su empleo facilita la comparación entre masas atómicas sin necesidad de usar cifras muy pequeñas para expresarse en gramos.

² Difusivo significa que tiene una gran capacidad de expandirse y mezclarse con otros gases de manera uniforme debido al movimiento aleatorio de sus moléculas



Compuesto	Densidad del gas (20 °C, 1 atm)	Densidad del líquido (-253 °C, 1 atm)
Hidrógeno	0.0899 kg/m ³	70.8 kg/m ³
Metano	0.65 kg/m ³	422.8 kg/m ³
Gasolina	4.4 kg/m ³	700 kg/m ³

Figura 2. Densidad del H₂ comparada con el CH₄ y la gasolina. Modificado de (Johannson Fredric, 2018) y (Moyado-Tirado, 2018).

Ya sea para facilitar su estudio, o simplemente porque se fue dando así de forma natural, debido a la manera en que se obtiene, al hidrógeno se le ha denominado en colores. Así, la clasificación que se muestra en la tabla 1 es la forma más común de referirse al hidrógeno (Africa Hydrogen, 2022).

Verde	Producido a partir de la electrólisis del agua
Azul	Producido a partir del gas natural, pero con la captura geológica de CO ₂ que resulta del proceso
Blanco	Hidrógeno que surge de manera natural producido en sustratos geológicos
Amarillo	Producido por el uso combinado de combustibles renovables y fósiles
Negro	Obtenido de la gasificación del carbón con la liberación a la atmósfera del CO ₂ resultante
Gris	Producido por cualquier fuente diferente al carbón, pero con la liberación de CO ₂ a la atmósfera
Naranja	Producido a través de inyectar una solución rica en carbono en una formación reactiva
Marrón	Producida de la gasificación del lignito
Magenta	Formado a partir de la energía nuclear

Tabla 1. Clasificación del H₂ por su forma de obtención. Modificado de (González Huerta Rosa de Guadalupe, 2023).

EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE EN LA SOLUCIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Es claro que, hasta ahora, la producción mayoritaria del H₂ se ha logrado por las tecnologías de color negro, gris y marrón y en menor medida y como producto de las presiones ambientales, más recientemente en el color azul. Sin embargo, la expectativa es que se encuentren maneras rentables que permitan desarrollar la tecnología verde a la par de dominar el conocimiento del origen del H₂ natural en medios geológicos (blanco) para avanzar más decididamente en el camino de la sostenibilidad energética. Enseguida se resume brevemente lo esencial de las tecnologías verde y blanca respecto del origen del H₂.

Hidrógeno Blanco

La surgencia natural del H₂, es conocida con el grado de profundidad con el que lo conocemos ahora, si bien, no total, gracias al descubrimiento del yacimiento de Bourakebougou, Mali en 1987 (Omar Maiga, 2023). El hidrógeno natural de Bourakebougou, en Malí, fue descubierto durante una operación de perforación para agua. Desde entonces, en el sitio se han perforado otros 24 pozos, que también han descubierto hidrógeno acumulándose en los huecos kársticos de hasta 100 m de profundidad en varios yacimientos de rocas carbonatadas y areniscas cubiertas por mantos de dolerita. Sin embargo, se ha reportado que uno de los pozos llegó al fondo del basamento calcáreo del Neoproterozoico. Por otra parte, el análisis de cromatografía de gases de la fase gaseosa en el yacimiento principal menos profundo ha demostrado que el gas está compuesto principalmente de H₂ natural (98%) asociado a nitrógeno y metano (1% cada uno). El registro de gases también ha mostrado un nivel muy alto en la relación H₂/CH₄ con valores generalmente más altos en la parte superior de cada yacimiento individual.

El origen de los yacimientos de Bourakebougou no es aceptado por todos los investigadores. Algunos piensan que es debido a la oxidación de formaciones con alto contenido de hierro de los antiguos cratones de esa región, asociados a la reducción del agua presente; mientras que otros proponen que la presencia de H₂ natural parece estar más asociada a filtraciones superficiales, en particular la de origen continental, pero también de diferentes contextos geológicos, como los sistemas hidrotermales de dorsales oceánicas y ofiolitas. Sin duda, aún resta mucho por definir sobre el origen de este reservorio de hidrógeno natural y otros que se han ido descubriendo en fechas posteriores.

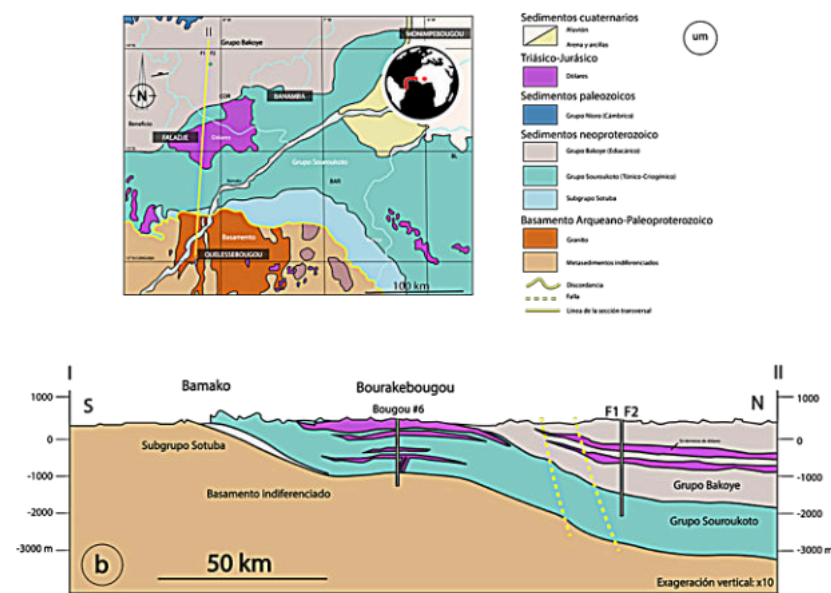


Figura 3. Esquema geológico del yacimiento de H₂ en Bourakebougou, Mali. (Omar Maiga, 2023).

Lo que sí se reconoce es que la manera ideal de obtener H₂ es tomarlo directamente de su estado nativo en la naturaleza, en particular de los diferentes estratos geológicos de donde procede debido a varios orígenes si bien con incertidumbre sobre su entendimiento completo (Gelman, 2025). Lo que sí se sabe es que el H₂ natural procede de la disociación de los átomos del agua así como de otros elementos, como metales, debido a que el H₂ existe abundantemente en forma de hidruros en los diferentes niveles geológicos del planeta, a saber:

- Hidruros iónicos, los formados con un metal alcalino o alcalinotérreo. Donde el hidrógeno actúa como ion H⁻(hidruro). Ejemplo NaH.
- Hidruros covalentes, los formados con elementos no metálicos con enlaces covalentes. Ejemplo: CH₄ y NH₃

- Hidruros metálicos, los formados con metales de transición donde el hidrógeno se disuelve en la estructura metálica. Ejemplo: TiH₂(hidruro de titanio).

Los orígenes geológicos del H₂ hasta ahora reconocidos por los investigadores de las ciencias de la tierra son:

- Serpentinización que es la reducción de agua por oxidación de minerales que contienen hierro en rocas ultramáficas (son reacciones de tipo serpentinización³) y que se lleva a cabo en diferentes horizontes del subsuelo profundo.
- Radiólisis es el proceso geológico mediante el cual, los átomos de hidrógeno y oxígeno se separan por la actividad energética de minerales radiactivos en diferentes niveles de la corteza y el manto terrestres, comúnmente estratos ricos en minerales de uranio y torio.
- Hidrógeno de origen muy profundo, es el que se deriva de fuentes profundas de la corteza inferior, o posiblemente más profundas. Se desconoce el mecanismo de generación exacto de esta fuente inferida, pero puede ser la descomposición o deshidratación, fusión de fases densas de silicatos hidratados introducidas por placas subducidas en el manto profundo (Gelman, 2025).

Con el origen del yacimiento de Bourakebougou aún por aceptarse por todos, hay hechos que han sido sumamente valiosos que se han determinado con exactitud. El descubrimiento durante la perforación de los primeros pozos de agua arrojó un caudal aproximado de 1500 m³H₂/día, a pesar de que no se trataba de un pozo que hubiera sido diseñado inicialmente para producir H₂ ni había sido cementado previo a la prueba.

Al analizar los datos de producción recopilados desde el descubrimiento del primer pozo histórico en 1987 hasta la actualidad, se ha observado que después de muchos años de operación para generar electricidad, no se ha registrado un descenso de presión como sería de esperar en un yacimiento convencional de petróleo y gas. Hasta la fecha, incluso se ha observado un aumento de presión (de 4,5 a 5 bar). Esto demuestra que la acumulación de H₂ se recarga progresivamente mediante un sistema dinámico. En el yacimiento carbonatado superior, el agua desempeña un papel de barrera en los acuíferos poco profundos por debajo del nivel freático en los que el H₂ debe migrar necesariamente en forma gaseosa (debido a su solubilidad casi nula a baja presión, lo que hace que la difusión sea cada vez menos eficiente hacia la superficie). Esto podría explicar por qué existe esencialmente la presencia de gas libre en un yacimiento muy poco profundo.

Hidrógeno Verde

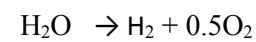
Son tres las vías principales para producir H₂ industrialmente: reformado de metano con vapor, gasificación de carbón y electrólisis del agua. Los dos primeros métodos dominan la producción mundial de hidrógeno, pero utilizan combustibles fósiles y emiten CO₂ como subproducto. Este tipo de hidrógeno cae en la clasificación de hidrógeno gris. Las emisiones de CO₂ se pueden reducir capturando y almacenando el carbono (CCS o CCUS), pero esto también aumenta el costo de producción y requiere un control estricto de las emisiones de metano (hidrógeno azul). La forma más limpia de producir hidrógeno es descomponer el agua utilizando fuentes de energía renovable, como la eólica, la solar, la hidroeléctrica, la geotérmica. Este tipo de hidrógeno se conoce como hidrógeno verde y no emite CO₂.

El fenómeno de la descomposición electrolítica del agua fue descubierto en 1789 por Paets van Troostwijk y Deiman (Yin, 2020). En 1800, William Nicholson y Anthony Carlisle utilizaron una batería que podía

³ La serpentinización ocurre cuando las rocas ultramáficas, es decir, ricas en minerales como olivino y piroxenos, reaccionan con el agua en baja temperatura y presiones moderadas formando minerales del grupo de las serpentininas como la antigorita, crisotilo y lizardita.

producir una corriente constante para electrolizar el agua y dieron nombre al proceso. Con el desarrollo de la ley de Faraday en 1833, se estableció la relación cuantitativa entre la cantidad de hidrógeno producido y la energía eléctrica utilizada. En 1869, Zénobe Gramme inventó la máquina Gramme, un dinamo que podía producir electricidad barata y continua. Esto hizo que la electrólisis del agua fuera un método viable para la producción de hidrógeno. En 1888 Dimitry Lachinov desarrolló una técnica para la síntesis industrial de hidrógeno y oxígeno a través de la electrólisis del agua. Para 1902, ya había más de 400 electrolizadores de agua industriales en funcionamiento. En 1939 entró en funcionamiento la primera gran planta de electrólisis de agua, con una capacidad de 10000 Nm³ H₂/h (Yang, 2025).

Un electrolizador es un dispositivo donde se introduce electricidad y la energía térmica almacenada en el hidrógeno se transforma en energía química. Básicamente, la reacción de electrólisis es la división electroquímica de las moléculas de agua haciendo pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos (cátodo y ánodo) que están separados dentro del agua. La reacción química que tiene lugar es:



Como los iones de hidrógeno (protones) son monovalentes, se necesitan dos moles de electrones para producir un mol de hidrógeno. Por lo tanto, se requiere una cantidad eléctrica de 2F para producir un mol de hidrógeno, mientras que F representa la constante de Faraday de 96,485 C/mol, la cantidad eléctrica de un mol de electrones. Como un metro cúbico de hidrógeno en el estado estándar es de 44,6 moles, la cantidad de electricidad necesaria para producirlo es de 89,3 Faraday, que es 2,393 Ah/Nm³ en unidades prácticas. Como la eficiencia de corriente de la electrólisis del agua es alta, se considera que 2,400 Ah es la cantidad de electricidad necesaria para producir 1 Nm³ de hidrógeno. Este valor se aplica especialmente en electrolizadores de fase líquida, excepto en los especiales con baja eficiencia de corriente (Yang, 2025).

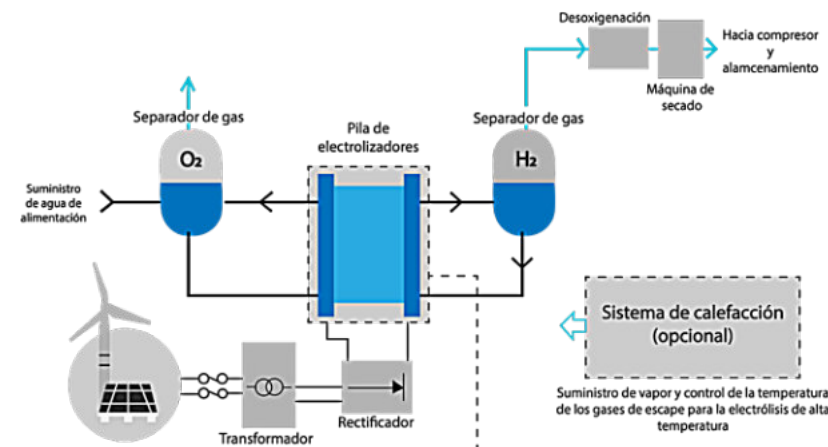


Figura 4. Esquema general de un electrolizador a nivel sistema. (Yang, 2025).

No obstante, la complejidad en el manejo del hidrógeno dadas sus características muy particulares como baja densidad, flamabilidad y difusividad, es considerado como la solución alternativa al uso de combustibles fósiles con miras al cambio climático. La escala de la demanda futura de almacenamiento de hidrógeno aún es incierta, sin embargo, los pronósticos globales estiman los volúmenes de almacenamiento necesarios en el orden de 580 – 650 bm³, superando los volúmenes operativos actuales para el almacenamiento subterráneo de gas natural. Tales volúmenes solo pueden alcanzarse en la práctica almacenando en formaciones subterráneas profundas, como cavernas de sal y roca, o depósitos de roca porosa como en los campos de gas agotados y acuíferos salinos. Estas opciones se denominan almacenamiento geológico de hidrógeno (AGH). Sin embargo, la implementación de AGH n el sector

energía aún está esperando proyectos piloto y demostrativos, que son esenciales para resolver lagunas de conocimiento y validar los de laboratorio y de modelado numérico en un entorno subterráneo real y a gran escala. Estos proyectos también son necesarios para desarrollar experiencias industriales, evaluar conceptos de casos de negocio viables y familiarizar a las partes interesadas y al público con las ventajas de su implicación (TCP-Task 42, 2022).

COMPORTAMIENTO DEL HIDRÓGENO EN SUBSUELO

Ya se ha discutido que son varias las formas de producción de H₂, pero por el resto del documento asumiremos que será la verde la que imperará globalmente en el futuro medio. La reacción electrolítica que se emplea para la obtención del hidrógeno verde requiere energía en cantidades significativas por lo que debe optarse por la del tipo renovable. Para darnos una idea de las cantidades de energía que se requieren, 9.1 toneladas de agua producen 1.1 toneladas de H₂ y ocho toneladas de O₂, sin emisión de CO₂ usando 39.4 MWh de energía, solar por ejemplo .

El H₂ puede utilizarse para movilizar todo tipo de motores fijos y móviles, sin embargo, se necesita un sistema de almacenamiento rentable y respetuoso con el ambiente para que el H₂ se pueda almacenar y recuperar adecuadamente cuando es requerido. El rendimiento energético de H₂ es mayor que el del metano (CH₄) (120 MJ/kg vs 45 MJ/kg), sin embargo, el almacenamiento masivo en superficie es todo un desafío debido a su baja densidad volumétrica de 0.0838 kg/m³ a 20°C y a presión atmosférica. Por otra parte, almacenar el H₂ de manera líquida también tiene sus inconvenientes porque sus 70.8 kg/m³ de densidad volumétrica tampoco son una opción adecuada debido a que herviría continuamente, lo que resulta en un sistema de almacenamiento ineficiente por las posibles fugas que enfrentaría con consecuencias variadas, sobre todo si estamos hablando de un almacenamiento superficial (Aftab, Hassanpouryouzband, Xie, Machuca, & Sarmadivaleh, 2022).

El AGH podría evitar los problemas técnicos que limitan su almacenamiento a presión atmosférica. Y aunque es definitivamente la opción más atractiva, sobre todo por la escala de su uso, no deja de tener problemas técnicos que se deben resolver antes de poder decir que es una tecnología completamente lista para su uso comercial confiable. En seguida se describen los conceptos fundamentales que dominan el panorama de los tipos de almacenamiento geológico de hidrógeno ya sean en el espacio poroso disponible en yacimientos agotados de hidrocarburos y acuíferos salinos profundos o en cavidades producto de la disolución de diapiros salinos o también llamadas cavernas de sal. Figura 5.

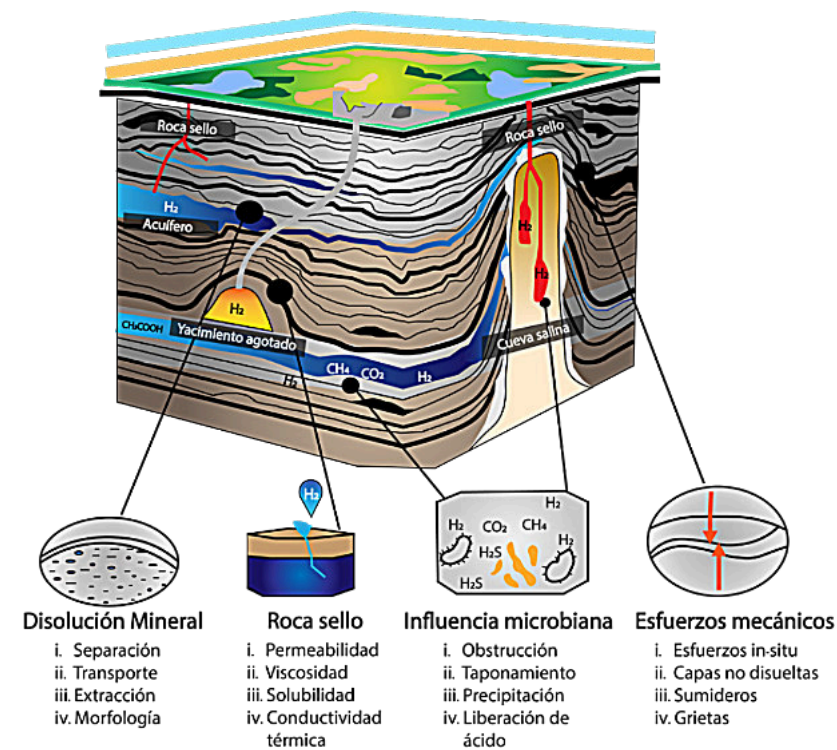


Figura 5. Esquema general de los diferentes tipos de AGH y los efectos del hidrógeno en las formaciones geológicas. cavernas de sal, acuíferos salinos y reservorios de gas agotados. (Aftab, Hassanpouryouzband, Xie, Machuca, & Sarmadivaleh, 2022).

Medios geológicos de almacenamiento de hidrógeno

AGH en yacimientos exhaustos de hidrocarburos

Una forma de almacenar H_2 geológicamente, es decir, a gran escala, conlleva a pensar en escenarios comercialmente prácticos, como es el caso de los yacimientos de hidrocarburos agotados. Esto se debe a que, a la fecha, los yacimientos agotados constituyen el medio de almacenamiento ya muy común de gas natural, pero, sobre todo que cuentan con una caracterización muy precisa de sus condiciones geológicas, que se generó durante las etapas previas a la operación y durante la extracción misma cuando el yacimiento estaba en explotación.

Se caracterizan por ser yacimientos de hidrocarburos porosos y permeables ubicados a miles de metros bajo la superficie, de los cuales se extraen casi todos los productos recuperables. En concreto, pueden considerarse como una porción de un acuífero donde solo existen cantidades residuales de agua dentro de los poros, ocupados predominantemente por petróleo/gas atrapado (figura 6). Generalmente, son fáciles de desarrollar, operar y mantener gracias a la infraestructura ya existente, de probada integridad. Los yacimientos de hidrocarburos agotados han demostrado su credibilidad desde entonces; han atrapado previamente hidrocarburos que migraron de las rocas madre subyacentes y presentan una estructura geológica bien identificada. El sistema de trampa puede ser estructural (anticlinal) o estratigráfico (capa impermeable), dependiendo de la naturaleza de la diagénesis del yacimiento. Sirven como un contenedor de almacenamiento adecuado, con suficiente permeabilidad para satisfacer el flujo operativo y un sistema de trampa eficaz para evitar la migración de fluidos por fugas. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022)

En comparación con las opciones en acuíferos de los que discutiremos en seguida, los yacimientos de gas agotados ofrecen mayores ventajas, ya que la existencia del gas remanente permite evitar la acumulación

masiva de gas colchón, necesaria para el mantenimiento de la presión durante las operaciones. Se requiere entre un 50 % y un 60 % de gas colchón, en comparación con el 80 % para los acuíferos. Sin embargo, si el remanente en el yacimiento agotado afecta la pureza del gas inyectado, puede afectar la integridad del hidrógeno almacenado durante la extracción.

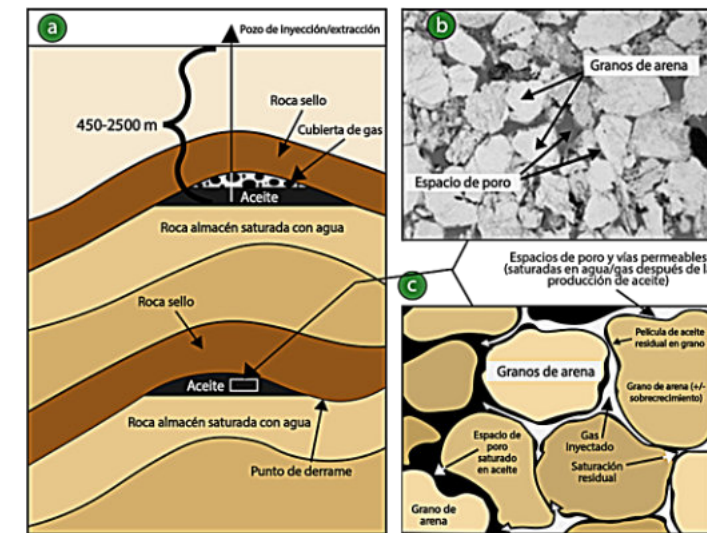


Figura 6. Condición general de un yacimiento exhausto de hidrocarburo (a); imagen microscópica de los poros con hidrocarburo (b), y cuando el H_2 evacua parcialmente el hidrocarburo remanente de los poros (c). (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022).

Asimismo, los microorganismos existentes en tales yacimientos pueden consumir el hidrógeno, lo que puede provocar su merma y la precipitación en el sistema poroso debido a la liberación de subproductos, incluido H_2S . No obstante, un almacenamiento en un medio poroso de yacimiento agotado de hidrocarburos ofrecerá siempre la ventaja de que su gas residual ofrece el gas de colchón⁴ que hace a la recuperación del H_2 más rápida y económica, al igual que la infraestructura de pozos y sistemas de bombeo y compresión que debieron haberse desarrollado durante la vida útil del yacimiento.

Otro aspecto a considerar es el relativo a la alta presión de la columna de hidrógeno, ya que puede tener un impacto considerable en la hermeticidad estructural de la formación almacenadora, por lo que es básico conocer de antemano la capacidad geomecánica del reservorio para no rebasar su resistencia límite. Esta otra de las ventajas de almacenar en yacimientos de gas agotados ya que previo a la explotación de los hidrocarburos se determinan con exactitud las presiones límite naturales y se cuida en todo momento de no sobrepasarlas, además de que las rocas sello proporcionan un sellado suficiente (Aftab, Hassanpouryouzband, Xie, Machuca, & Sarmadivaleh, 2022).

Existe algo de experiencia práctica en el almacenamiento de hidrógeno en espacios porosos que se desarrolló durante el almacenamiento para electricidad urbana en combinaciones de 50% H_2 , con CH_4 , CO_2 , CO y N_2 en Alemania, Francia y la República Checa donde fueron operados con éxito durante décadas antes de que se convirtieran en almacenamiento de gas natural en la década de 1980. (Aliakbar Hassanpouryouzband, 2022)

Aunque falta mucho por descubrir del comportamiento de hidrógeno almacenado en medios porosos, se sabe hasta ahora que las principales barreras que restringen su desarrollo son los siguientes:

⁴ Gas de colchón es el que debe residir permanentemente en el almacenamiento para que cuando se inicia la recuperación en este caso del H_2 , no se tenga que partir de cero con la consecuente inversión del tiempo en la recuperación mientras se alcanza la presión mínima de extracción.

- El hidrógeno se caracteriza por una menor viscosidad y mayor movilidad que el gas natural y el dióxido de carbono. Por lo tanto, el comportamiento del H₂ inyectado debe investigarse en términos de movilidad y propiedades multifásicas para garantizar que las eficiencias de recuperación se mantengan.
- El hidrógeno actúa como donante de electrones en procesos microbianos. La aparición y el comportamiento de microbios hidrogenotróficos deben ser investigados para determinar el impacto de las posibles pérdidas en el consumo de hidrógeno y cambios de composición del hidrógeno almacenado.
- La promoción de reacciones geoquímicas abióticas entre las rocas del reservorio, fluidos de formación y el hidrógeno almacenado. Estas reacciones pueden ser perjudiciales para el almacenamiento geológico de hidrógeno alterando la composición del hidrógeno almacenado y provocando precipitación y disolución de minerales que pueden afectar la integridad del yacimiento y eficiencias de recuperación.

La experiencia ganada en el gas urbano en Ketzin (Alemania) y Beynes (Francia) proporcionó un contexto sobre la importancia potencial de interacciones geoquímicas en el almacenamiento subterráneo de hidrógeno. En ambos casos, se produjeron alteraciones en la composición del gas almacenado. Bourgeois, Aupaix, Bloise, & Millet, 1979, sugieren que el aumento de la concentración de sulfuro de hidrógeno observada en Beynes puede ser explicado por la reducción abiótica de la pirita en contraposición a la acción de las bacterias reductoras de sulfato.

En Ketzin, las pérdidas de gas fueron del orden de $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ entre 1964 y 1985. Los procesos que causan la pérdida de gas y la evolución del gas no han sido identificados plenamente pero no se considera suficientemente aceptada tan sólo por la degradación microbiana. Las investigaciones de reacciones abióticas de hidrógeno en medios porosos son todavía escasos y no describen suficientemente el grado en el que se podrían esperar reacciones geoquímicas durante el almacenamiento geológico de hidrógeno. (Aliakbar Hassanpouryouzband, 2022).

Se sabe también que el aumento de las concentraciones de hidrógeno en los yacimientos porosos puede promover reacciones redox, lo que resulta en la oxidación del hidrógeno y la reducción de los receptores de electrones (nitrato, Fe³⁺, sulfato y carbonato). Se pueden observar reacciones redox inducidas por H₂ con minerales que contienen hierro, hematita, micas y arcillas que contienen Fe³⁺ y se ha observado experimentalmente la disolución generalizada de cementos de calcita y anhidrita tras la exposición al hidrógeno a presiones elevadas (10–20 MPa, <40 °C), lo que conduce a un aumento de la porosidad. De probarse a escala real, las reacciones descritas tienen el potencial de alterar la permeabilidad del yacimiento y de la roca sello, amenazando su integridad.

AGH en acuíferos salinos profundos

Otra forma de almacenamiento en espacio poroso del subsuelo es en acuíferos salinos profundos. El cuestionamiento principal en esta forma de reservorio es sobre los posibles problemas asociados a la disolución de los minerales en el acuífero y corte de agua⁵ que se traería como consecuencia durante el período de extracción de hidrógeno. En general, se puede decir, que pueden ocurrir diferentes mecanismos de daño a la formación debido a la movilización y migración de finos durante la inyección/extracción de hidrógeno (Aftab, Hassanpouryouzband, Xie, Machuca, & Sarmadivaleh, 2022). Por lo pronto, se sabe del efecto del almacenamiento de hidrógeno en areniscas que frecuentemente se comporta inerte con signos

⁵ Corte de agua es la interrupción momentánea del flujo de H₂ por la afluencia de agua hacia el pozo de extracción por la presión que se ejerce en el acuífero.

mínimos de disolución mineral en las condiciones de temperatura variable del yacimiento; asimismo en lutitas debido a las micas y el carbonato de calcio que parecen no reaccionar. En la figura 7 se aprecian los principales elementos de un AGH en un acuífero salino profundo.

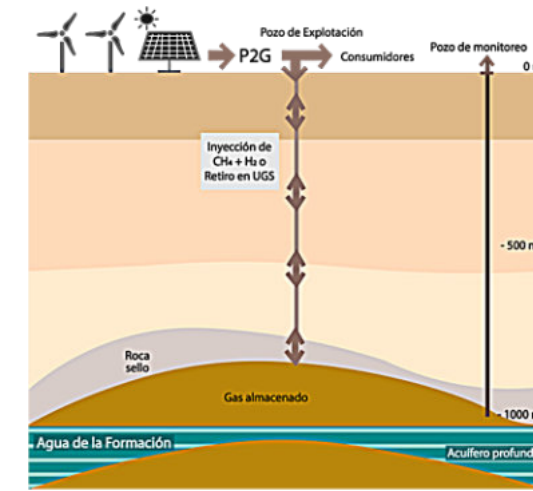


Figura 7. Esquema general de los elementos de un AGH en un acuífero salino profundo. (P. G. Haddad, 2022).

Cuando se inyecta H₂ en un acuífero previamente lleno de agua, se produce un cambio de densidad entre el gas inyectado y el líquido debido al aumento de presión, lo que provoca el desplazamiento del líquido hacia abajo o hacia los lados para crear espacio de almacenamiento. Se genera una interfaz líquido-gas como resultado del aumento continuo de presión durante las actividades de inyección, además del desplazamiento. Desafortunadamente, la interfaz establecida se convierte en una desventaja para el acuífero usado para almacenamiento, ya que afecta el proceso de extracción. Como resultado, se proyecta que el movimiento de la interfaz gas-líquido durante la extracción de H₂ conduzca a la generación simultánea de líquido durante la extracción de gas. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022)

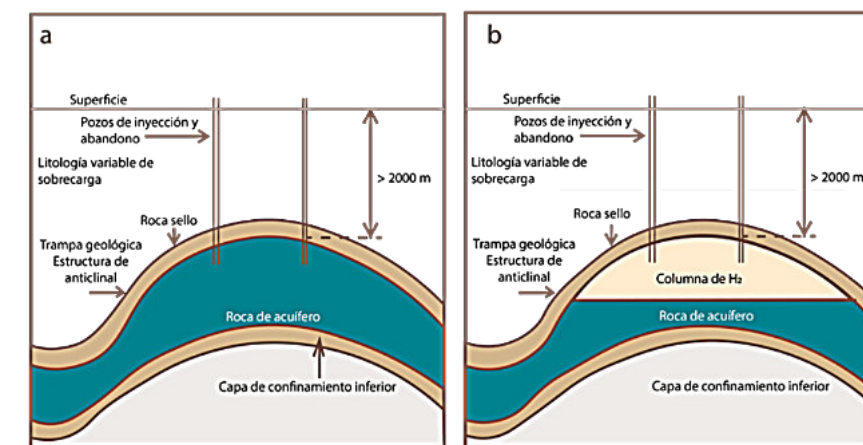


Figura 8. Esquema de un AGH en acuífero antes y después de la inyección de H₂. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022).

Es fundamental destacar que el volumen de gas que puede almacenarse está determinado por el volumen y la porosidad del yacimiento, así como por la temperatura y la presión del gas almacenado. Las necesidades de gas de colchón para los acuíferos suelen ser mayores que las de los yacimientos agotados, debido a que el gas natural presente en algunos yacimientos agotados para contrarrestar el volumen total necesario no

está disponible. Como resultado, la cantidad de gas de colchón en los acuíferos podría alcanzar el 80 % de la capacidad total del yacimiento, lo que indica que el gas de trabajo podría ser tan bajo como el 20 %.

Por otra parte, un estudio reciente que simulaba el acuífero UGS Pb_T_1 situado en la región de la cuenca Parisina se simuló en un reactor de alta presión. Se estudiaron los efectos del H₂ al 10% almacenado con metano y bióxido de carbono a través de la identificación de interacciones entre la roca del yacimiento, el agua de formación, la vida microbiana autóctona y la nueva mezcla de gases. (P. G. Haddad, 2022). Al principio, se reprodujeron las condiciones reales de almacenamiento con CH₄ y CO₂ formando la mezcla de gases. La fracción de H₂ se inyectó el día 21 después del desarrollo del sistema. Aunque los análisis de difracción de rayos X (DRX) mostraron un agotamiento de calcita y barita en la fase sólida, lo que indica disolución mineral, la matriz sólida mostró una disminución en su porosidad y precipitación de sulfuro de hierro, probablemente originada por presencia de arcilla. A una solución de pH constante, la inyección de H₂ probablemente causó esas alteraciones minerales, así como la actividad del ecosistema microbiano. En menos de 90 días tras la simulación de un acuífero de almacenamiento de gas natural, casi el 40% del H₂ inyectado se transformó en H₂S, formiato y metano debido a la actividad microbiana y se disolvió en la fase acuosa. Esta disminución de H₂ se desaceleró significativamente con la desaparición del 1% original de CO₂ de la fase gaseosa y de una gran parte de la calcita presente en la fase sólida. Es probable que, a menor escala, el H₂ siguiera siendo consumido por microorganismos hidrogenotróficos, asociado al consumo de CO₂ producto de la degradación de materia orgánica por microorganismos heterótrofos. (P. G. Haddad, 2022)

Para garantizar la seguridad y eficacia de la inyección de H₂ en el subsuelo, se deben considerar diversos parámetros. Los resultados de P.G. Haddad et al mostraron que el almacenamiento de H₂ podría tener un impacto considerable en la roca del yacimiento, especialmente si es rica en calcita, ya que esta puede disolverse como consecuencia del dióxido de carbono para su bioconsumo. La disolución de minerales puede causar variaciones en las características petrofísicas del yacimiento, como la porosidad y la permeabilidad. Además, se consume H₂ una fuente de energía crucial para la vida microbiana. Estos fenómenos afectan la composición del gas almacenado y contribuyen a la pérdida de H₂. Asimismo, en acuíferos ricos en sulfatos, el sulfuro de hidrógeno producido por microorganismos reductores de sulfato puede agriar el gas almacenado a menos que haya suficientes cantidades de hierro disuelto para mineralizar los sulfuros. Lo anterior evidencia que se requiere de estudios de diferentes acuíferos bajo diversas condiciones de presión, temperatura, composición de gases y agua que pueden ayudar a optimizar el almacenamiento de H₂ en el subsuelo. Además, para modelar la evolución del almacenamiento futuro en medios porosos que albergan vida, y con posibles microorganismos en las salmueras residuales, es fundamental considerar las concentraciones de sulfato, el CO₂ y la actividad microbiana para evitar resultados desfavorables.

AGH en cuerpos salinos

Un tercer escenario geológico del almacenamiento de H₂, es el que se lleva a cabo en cavernas de sal. Hay diferentes morfologías de cuerpos masivos de sal. Las cavernas son cámaras artificiales creadas (perforadas) dentro de domos salinos o depósitos de sal estratificados en un pozo cilíndrico de gran espesor mediante la inyección controlada de agua dulce desde la superficie hasta los depósitos. Este proceso esencial se conoce como minería por disolución. La figura 9 muestra una representación típica de la estructura de una caverna salina y el efecto de diferentes técnicas de disolución. Una caverna salina típica puede tener hasta 2000 m de profundidad, 1 000 000 m³ de volumen, de 300 a 500 m de altura y de 50 a 100 m de diámetro, lo que permite un almacenamiento masivo y una ventana de presión del 30 al 80 % de la presión litostática. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022)

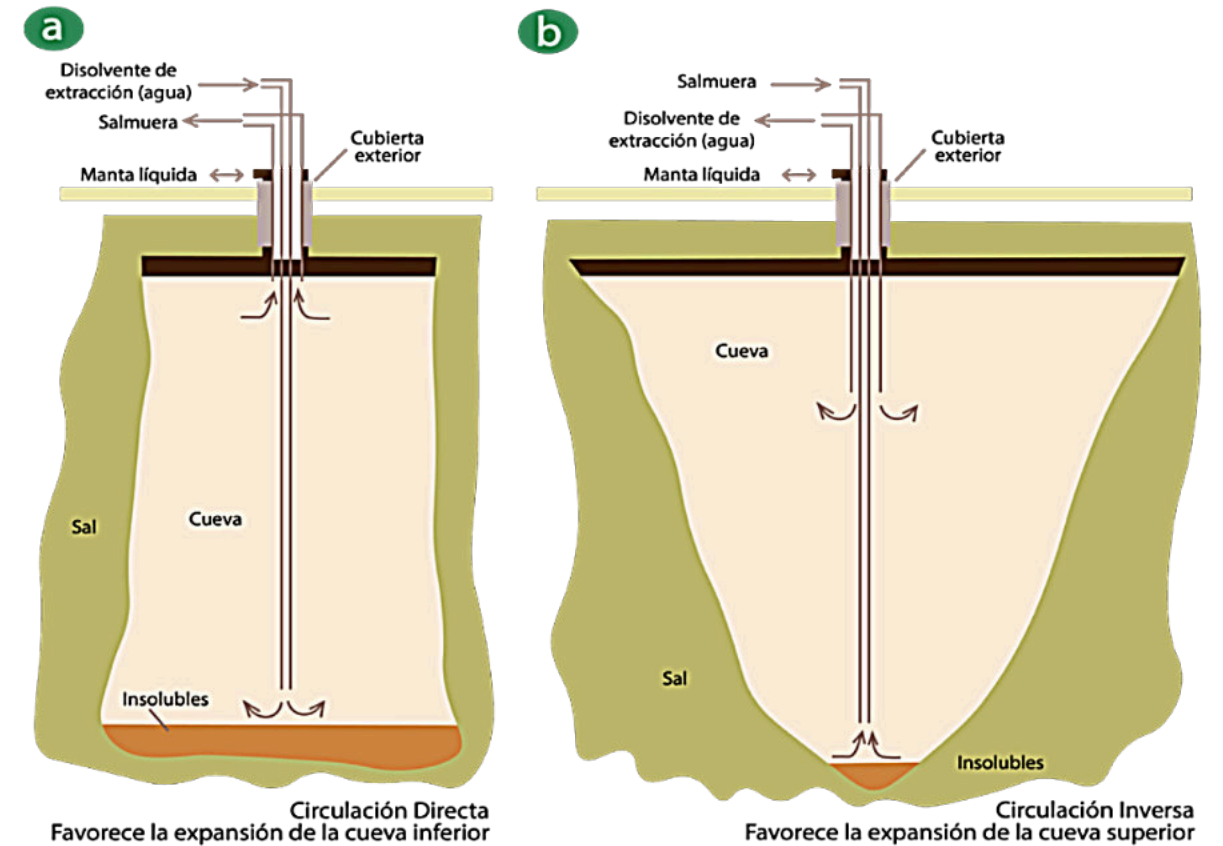


Figura 9. Esquemas típicos de disolución salina en cavernas para usarse como AGH. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022).

Por otra parte, los domos salinos son cuerpos sólidos y homogéneos, por lo que construir una caverna estructuralmente robusta para una profundidad operativa inferior a 2000 metros es más sencillo. Sin embargo, a una profundidad superior a 2000 m, la deformación de la sal puede ocurrir debido al aumento de presión y temperatura, incluso cuando se construye una caverna bien diseñada. Por otro lado, las sales estratificadas son capas más delgadas que se encuentran a una profundidad considerablemente menor que los domos, con halita p. ej., NaCl) alternando con estratos no solubles como dolomita, anhidrita y lutita. Es fundamental señalar que las cavernas construidas sobre formaciones de sal estratificada son más delgadas y menos estables debido al alto grado de heterogeneidad del tipo de roca.

Guardar gases en cuerpos de sal es una tecnología probada, sobre todo en la industria del gas natural. Se conocen y dominan los parámetros debidos a su inversión económica, propiedades de sellado y requisitos mínimos de gas de colchón. En este ambiente, el problema asociado más común es el debido a los microorganismos, en particular las bacterias reductoras de sulfatos (BRS), que pueden desarrollar el riesgo de liberación de H₂S como subproducto en las cavernas de sal. Además, la liberación de ácido sulfhídrico y el comportamiento dispersivo de hidrógeno pueden catalizar la fragilización en el ensamble de revestimiento y terminación de los pozos extractores e inyectores, lo que resultaría en fugas. Las BRS pueden consumir hidrógeno en su sistema metabólico y producir gases como CH₄, CO₂ y H₂S (Aftab, Hassanpouryouzband, Xie, Machuca, & Sarmadivaleh, 2022). Figura 10.




Microbios hidrogenotróficos	Reacción y posible mineralización	Impacto
SRB (Bacteria) 	$SO_4^{2-} + 4H_2 + 2H^+ \rightleftharpoons H_2S + 4H_2O$ [3] El H ₂ reacciona con anhídrida y otros sulfatos inorgánicos y los reduce de sulfatos a sulfuros	<ul style="list-style-type: none"> - Liberación de H₂S - Alta liberación de sulfuros - Mezcla de gases - Corrosión de hierro - Reducción del pH - Fragilización por hidrógeno - Precipitación mineral
Bacterias reductoras de hierro (Bacteria) 	$3Fe_2O_4 + 5H_2 \rightleftharpoons 2Fe_3O_4 + H_2O$ [4] Los microbios pueden reducir la película pasiva, por ejemplo, los componentes férricos en superficies metálicas. El agua subproducto puede liberarse y ocupar el espacio poroso intersticial de la arenisca, causando un exceso de saturación de agua y la disolución de minerales.	<ul style="list-style-type: none"> - Baja reducción de sulfuros - Corrosión de metales - Corrosión del acero al carbono - Disolución mineral
Metanógenos (Arquea) 	$CO_2 + 4H_2 \rightleftharpoons CH_4 + 2H_2O$ [5] En casos excepcionales, los microbios se adhieren a los bordes de la caolinita y evitan el flujo del CH ₄ . Los iones de aluminio provenientes de la caolinita pueden ser tóxicos para el crecimiento de metanógenos.	<ul style="list-style-type: none"> - El flujo del CH₄ se suprime en la caolinita - Mezcla de gases - Corrosión del acero al carbono - La capacidad de extracción e inyección se reduce - Posible alteración de la permeabilidad y porosidad

Figura 8. Principales transformaciones bióticas e impactos en el AGH. (Aftab, Hassanpouryouzband, Xie, Machuca, & Sarmadivaleh, 2022).

La metanogénesis, la homoacetogénesis y la reducción de sulfatos son los tres procesos principales que conducen al consumo de hidrógeno en escenarios geológicos. Entre las muestras de agua en yacimientos de hidrocarburos, se ha encontrado actividad microbiana a una temperatura >122 °C y salinidad de NaCl >4,4 M, por lo que el monitoreo de la actividad geoquímicas y microbianas es esencial en la sostenibilidad del almacenamiento dada la baja densidad, baja viscosidad y alta difusividad lo que podría causar pérdida de hidrógeno y afectar críticamente la capacidad de su extracción, lo que podría evitarse planificando debidamente los escenarios de inyección y extracción del H₂. Un esquema que simplifica la acción bacteriana por tipo de compuesto afín en los AGH se encuentra en la figura 9.

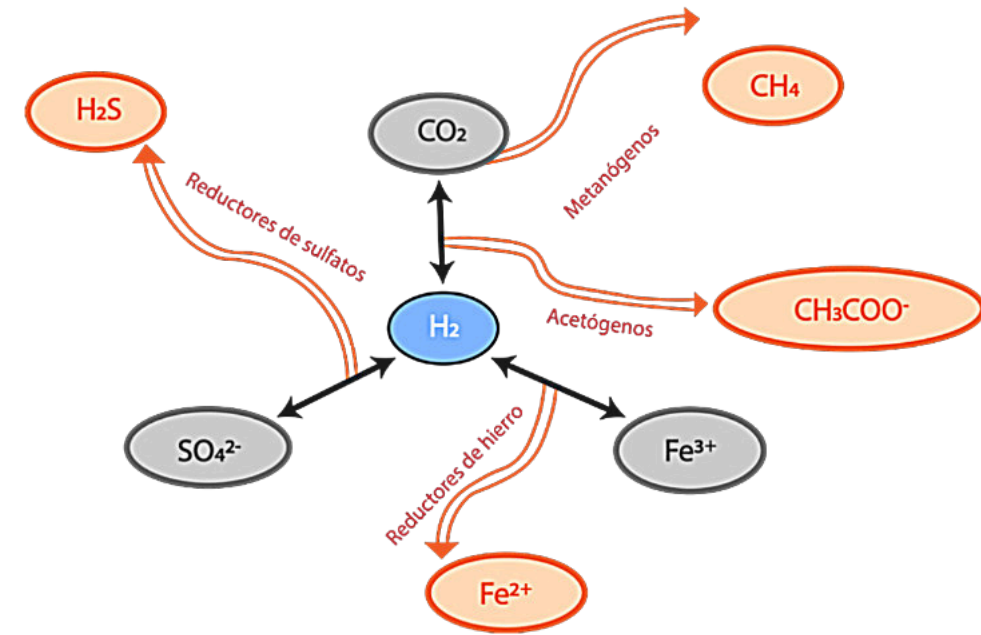


Figura 9. Esquema simplificado de los tipos de bacterias y los compuestos que reaccionan con el H₂ en un AGH. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022).

Consideraciones generales de los AGH independientemente de su modalidad

Independientemente de la forma de AGH, un aspecto fundamental es el debido a la integridad de los pozos, que deben ser capaces de soportar condiciones extremas y diversas cargas durante su vida útil, así como prevenir posibles fugas y corrosión en presencia de fluido de formación. La pérdida de la integridad del pozo provocará el fracaso del proyecto o incluso provocará accidentes por explosión de hidrógeno, lo que conlleva a pérdidas económicas e incluso pone en peligro la salud y la vida de las personas. Para controlar las fugas de hidrógeno, la mejora de la operación de terminación y el sistema de barrera, por ejemplo, el cemento, es un requisito previo importante para la implementación del almacenamiento. Considerando la fuerte difusión del H₂ es necesario estudiar cuidadosamente la permeabilidad y la porosidad del cemento después de la cementación para determinar si el hidrógeno penetrará o no esa barrera. Se requiere un análisis más profundo del impacto del hidrógeno en los materiales de acero, que se caracteriza principalmente por la formación de ampollas, el agrietamiento inducido y la fragilización. La formación de ampollas es una de las principales causas del agrietamiento y la fragilización por hidrógeno, que suele provocar accidentes graves. En comparación con el gas natural, la calidad de los materiales metálicos para almacenar H₂ debe ser mucho mayor. Si la tensión de la tubería de revestimiento o la microporosidad de su interior aumenta gradualmente, la falla de la tubería se producirá repentinamente. En presencia de una alta concentración de H₂ la presión para que se produzca un agrietamiento inducido por hidrógeno es mucho menor que en condiciones normales de temperatura y presión.

Algunos investigadores han encontrado una manera de reducir el agrietamiento inducido por hidrógeno mediante experimentos con acero inoxidable. Han observado que el acero con mayor contenido de níquel (>12%) y la presencia de gas nitrógeno pueden prevenir eficazmente la permeación y la difusión del hidrógeno del metal.

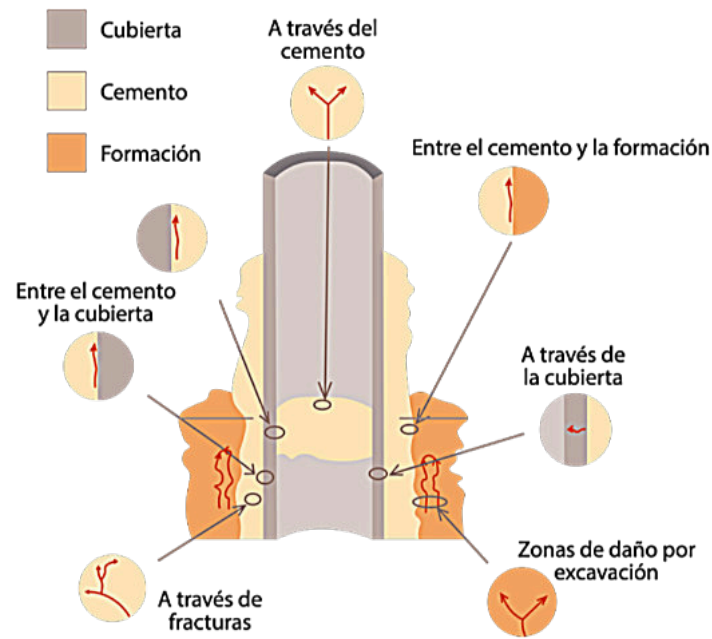


Figura 10. Vías potenciales de escape del H₂ en los pozos del almacenamiento. (Mingxing Bai, 2014).

En cualquiera de las formas de almacenamiento geológico, solo se puede extraer una parte del gas de todo el espacio subterráneo durante la operación, el 25% al 75% restante debe retenerse en el sitio para proporcionar la presión necesaria, evitar la intrusión de agua y garantizar la estabilidad del sistema de almacenamiento. Dado que el gas colchón y el gas natural tienen generalmente los mismos ingredientes, la pureza no importa en la producción de gas natural. A diferencia de otros gases el hidrógeno y el gas metano se mezclan fácilmente, lo que afecta la pureza del hidrógeno al extraerlo del yacimiento. Si no hubiera separación de gases, el aprovechamiento del hidrógeno se vería gravemente afectado. Las tablas 2 y muestran que, en las mismas condiciones, la capacidad de producción de hidrógeno es mayor que la del gas natural, debido a la menor proporción de gas colchón en el yacimiento.

Características	Unidad	CH ₄	H ₂
Peso molecular	g/mol	16	2
Densidad a 20 °C	kg/m ³	0.717	0.0899
Capacidad calorífica específica	kJ/(kg K)	2.165	14.05
Rango de explosividad	vol % aire	5-15	4.1-75
Punto de ignición	°C	600	560
Viscosidad dinámica a 20 MPa/50 °C	mPa s	0.018437	0.00935

Tabla 2. Comparación de las características físicas y químicas del H₂ y el gas natural. (Mingxing Bai, 2014).

Fracción de gas base (colchón)	UHS		UGS	
	Yacimientos de petróleo y gas agotados	Acuíferos	Yacimientos de petróleo y gas agotados	Acuíferos
	33%	33-66%	50%	80%
Capacidad de producción	2,400,000 m ³ /h		4 (1-30) miles m ³ /h	
Duración	6 meses		70 (20-150) días	
Profundidad	500-3500 m		500-3500 m	

Tabla 3. Diferencias en almacenamiento de gas natural e hidrógeno respecto de su capacidad como gas colchón. (Mingxing Bai, 2014).

Todo gas almacenado en subsuelo tiene una columna óptima para dejarlo permanentemente inmóvil en subsuelo. La altura de esa columna está dada por la ecuación:

$$h = \frac{\sigma \cos \theta}{g \Delta \rho}$$

Donde h es la columna de gas que se inmoviliza permanentemente debajo del sello, g es la constante gravitacional, es la diferencia entre de densidades del agua y el gas, se refiere a la tensión interfacial agua-gas, y θ es el ángulo de contacto agua-roca-gas. Es claro que todos esos parámetros se ven afectados por la presión y temperatura, considerando un gradiente hidrostático de 10 MPa/km y un gradiente geotérmico de 50 K/km y se pueden hacer las estimaciones expresadas en las gráficas de la figura 11.

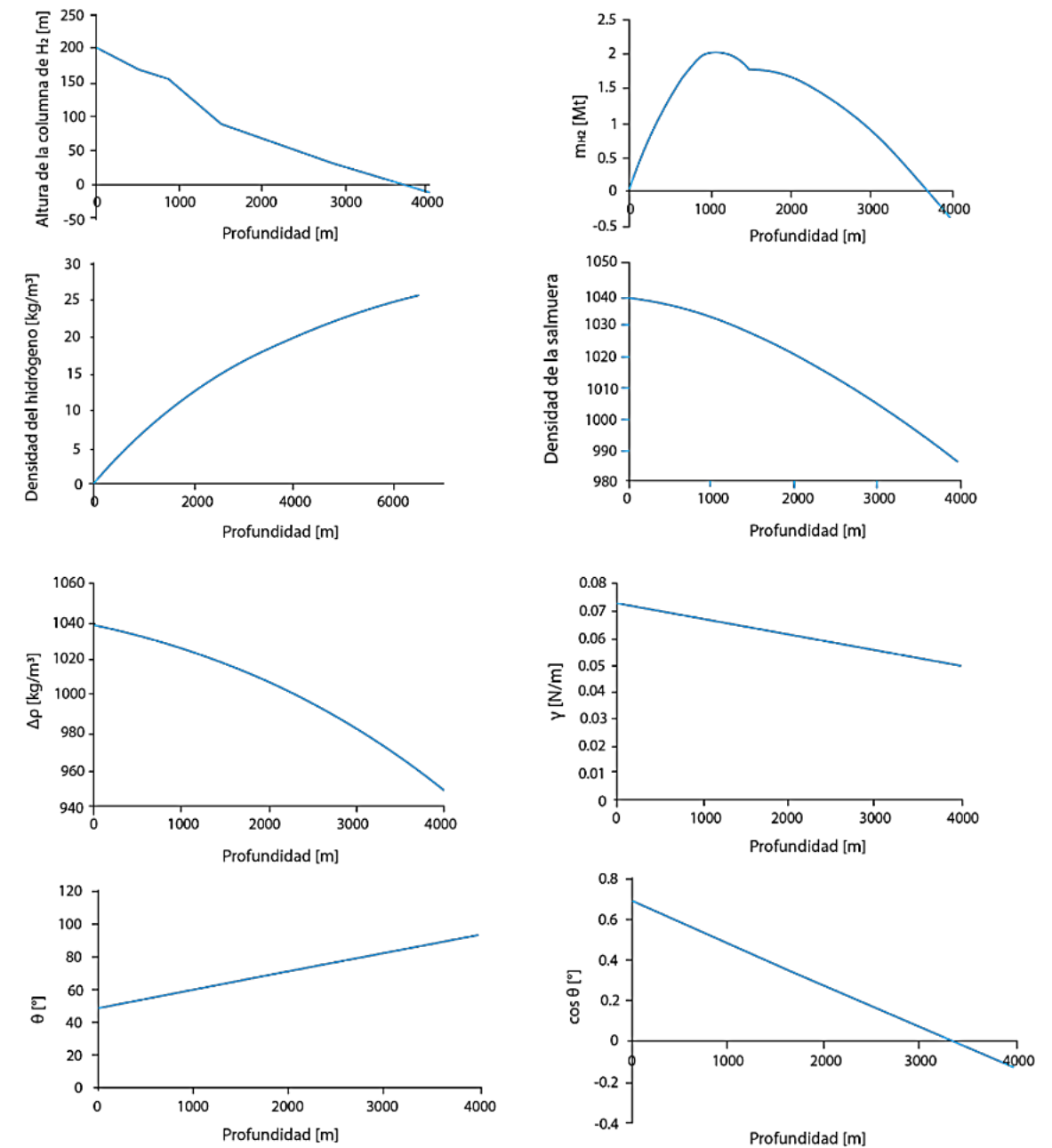


Figura 11. Principales parámetros involucrados en la profundidad óptima de un almacenamiento de H₂. Densidad del H₂, densidad del agua salobre, diferencia de densidad H₂-agua, tensión interfacial H₂-agua, ángulo de contacto H₂-agua-roca sello. Todo se grafica respecto de la profundidad. (Iglauer, 2022).

Independientemente de la modalidad de almacenamiento subterráneo, el principal mecanismo de almacenamiento propuesto para el H₂ en el subsuelo es el atrapamiento estructural, donde una roca de cubierta proporciona un sello geológico a través del cual el H₂ puede fluir debido a la alta presión capilar de entrada (de H₂) en la roca de cubierta. Sin embargo, es evidente que el H₂ puede migrar hacia arriba si las fuerzas de flotabilidad superan las fuerzas capilares, que a su vez dependen de la cantidad (columna) de H₂ almacenada. Las gráficas de la figura 11 muestran que h no es una constante, sino que disminuye con la profundidad y alcanza un valor cero a 3700 m de profundidad. Por lo tanto, no se recomienda el almacenamiento a largo plazo de H₂ por debajo de esta profundidad límite, ya que el H₂ se filtraría hacia arriba a través de la capa de roca de cubierta debido a la inversión de la mojabilidad a esta profundidad. Es importante destacar que la masa de H₂ que se puede almacenar (mH₂), que es una propiedad fundamental de interés, alcanza un máximo a 1100 m de profundidad. Por lo tanto, existe una profundidad de almacenamiento a la que se puede almacenar un máximo de H₂ (Iglauer, 2022)

En la tabla 4, se presenta un resumen de los principales parámetros considerados y estudiados en algunos de los principales AGH globalmente, por tipo de reservorio. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022).

Cuevas de sal				
País	Región/Localización	Propiedades	Perspectiva(s) del estudio	Referencia
Dinamarca	- Lille Torup	- Presión: 50-100 bar - Temperatura: 40-50 °C - Profundidad: 1270-1690 m - Capacidad: 445 x 10 ⁶ Nm ³	- Uso potencial del yacimiento de CH ₄ para almacenamiento de H ₂	Sorenson (2007)
Turquía	- Yacimiento de gas de Tuz Golu	- Presión: 220 bar - Profundidad: 1100-1400 m - Capacidad: 12 x 630,000 m ³	- Uso potencial del yacimiento de CH ₄ para almacenamiento de H ₂	Ozarslan (2012)
Turquía	- Nombrado como A1 por los autores		- Características socioeconómicas y de riesgo	Deveci (2018)
Canadá	- Unidad salina A2	- Profundidad: 525 m - Capacidad: 9.5 millones m ³ - Espesor: 45 m	- Uso potencial del yacimiento de CH ₄ para almacenamiento de H ₂ Mineralogía y criterios geológicos, p. ej., profundidad	Lemieux et al. (2019)
Canadá	- Unidad salina B	- Profundidad: 400 m - Capacidad: 6.4 millones m ³ - Espesor: 90 m	- Uso potencial del yacimiento de CH ₄ para almacenamiento de H ₂ Condiciones mineralógicas	Lemieux et al. (2019)
Rumania	- Ocna Mureş - Targu Ocna - Cačica		- Ubicación y geología - Disponibilidad y consumo de la salmuera y	Lordache et al. (2014)
Alemania	- Renania del norte-Westfalia - Noroeste - Centro	Capacidades - 2.4 mil millones m ³ - 4.6 mil millones m ³ - 1.8 mil millones m ³	- Viabilidad económica y conversión del almacenamiento de gas CH ₄ en almacenamiento de H ₂ - Conveniencia de la ubicación	Michalski et al. (2017)
Polonia	- Góra		- Litología y tipo de depósito de sal - Gradiente geotérmico - Escenarios de exploración - Profundidad del yacimiento y volumen	Lewandowska-Śmierczalska et al. (2018)
Polonia	- Damasławek - Łanięta - Lubień - Goleniów - Izbica - Kujawsca - Dębina		- Tamaño y profundidad de los domos salinos - Complejidad estructural - Informes geológicos existentes y capacidad de las reservas de sal - Reconocimiento de domos salinos	Tarkowski & Czapowski (2018)
Acuífero(s)				
País	Región/Localización	Propiedades	Perspectiva(s) del estudio	Referencia
Polonia	- Chabowo		- Escenarios de exploración - Profundidad del yacimiento y volumen de poros - Actividad tectónica - Litología de las rocas de sobrecarga	Lewandowska-Śmierczalska et al. (2018)
España	- Cinturón de San Pedro	- Permeabilidad: 100 mD - Porosidad: 20%	- Tasa de recuperación para el almacenamiento estacional de H ₂ producido a partir de energía eólica	Sainz-García et al. (2017)
Canadá	- Pico Simón	- Presión: 76 bar - Porosidad: 15% - Profundidad: 800 m - Capacidad: 775 x 10 ⁶ toneladas de CO ₂	- Analizado con base en la aplicación anterior sobre captura y secuestro de carbono	Lemieux et al. (2019)

Yacimientos agotados

País	Región/Localidad	Propiedades	Observaciones	Referencia
Alemania	- Schleswig-Holstein	- Presión: 65 bar - Porosidad: 13%-33% - Permeabilidad: 2.1-572 mD - Profundidad: 400-490 m	- Factibilidad de almacenamiento de H ₂ en los yacimientos de gas natural comprobados - Capacidad de entrega en el rendimiento del almacenamiento	Pfeiffer & Bauer (2015)
Polonia	- Przemysł		- Litología de la roca de sobrecarga - Actividad tectónica y diagenética - Profundidad del yacimiento y volumen de poro	Lewandowska-Smierczalska et al. (2018)
Reino Unido	- Midland Valley	- Permeabilidad: 2.1-572 mD - Espesor: 400-490 m	- Incertidumbre geológica - Capacidad de almacenamiento	Heinemann et al. (2018)
Reino Unido	- Instalación de almacenamiento para gas no procesado	- Presión: 50-100 bar - Porosidad: 20% - Permeabilidad: 75 mD - Profundidad: 2743 m - Capacidad: 48 millones m ³	- Estabilidad química - Consumo biológico - Retos debido a filtraciones - Condiciones operacionales	Amid et al. (2016)

Tabla 5. Resumen de los mejores ejemplos de almacenes subterráneos de gases y sus parámetros, para considerar almacenamiento de H₂. (Nasiru Salahu Muhammeda, 2022).

Costos de almacenamiento geológico de H₂

De las alternativas analizadas, almacenar el H₂ en yacimientos exhaustos de hidrocarburos es la opción más rentable, sobre todo, debido a la infraestructura heredada con la que cuentan. Sin embargo, la velocidad de recuperación del gas, es decir, la frecuencia de los ciclos afectaría el costo total del sistema de almacenamiento y podría hacer que el almacenamiento de sal sea más atractivo económicamente y que las cavernas se vuelvan atractivas y la capacidad de un sitio para reciclar el producto varias veces al año reducirá el costo de almacenamiento nivelado. (Anna, 2020). En la figura 12 se esquematizan los costos de caverna en roca dura (diferente a la de sal) aunque en este artículo no se contemplan por no contarse con información al menos como las aquí abordadas, pero sobre todo por ser en una muy buena medida menos naturales, pues hay que labrarlas y blindarlas artificialmente.

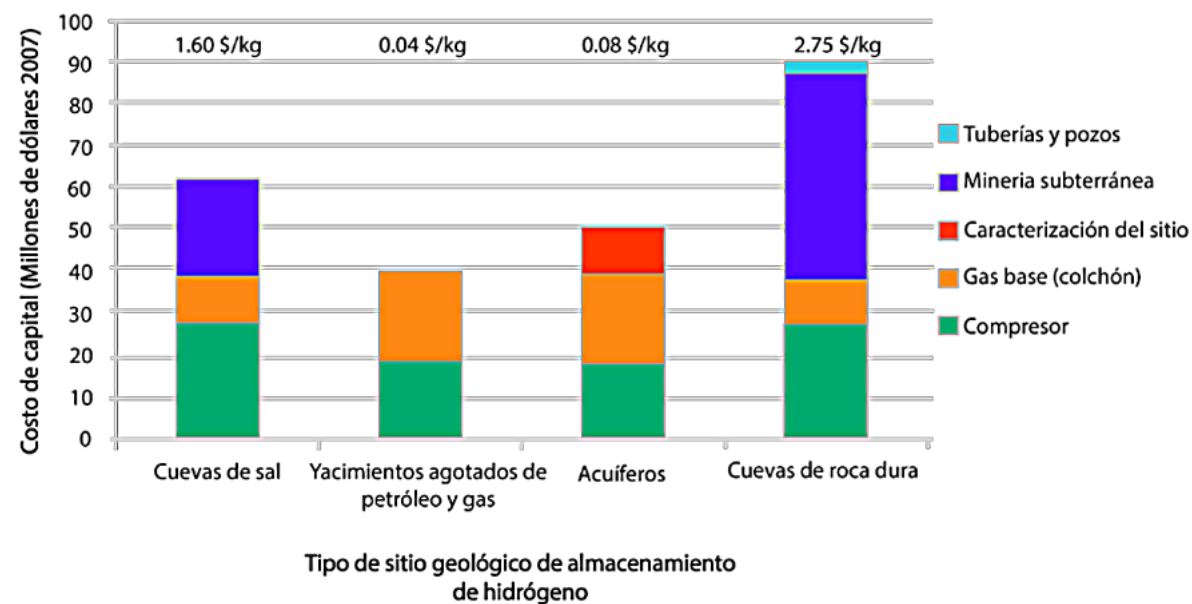


Figura 12. Costos de capital y de un año de O&M nivelados para diferentes tipos de almacenamiento. (Anna, 2020).

LA DEMANDA DE HIDRÓGENO

El suministro mundial de hidrógeno aumentó un 2,5% en 2023 respecto a 2022, hasta alcanzar 97 Mt H₂. La demanda fue cubierta principalmente por la producción nacional en centros industriales, con un comercio internacional mínimo. China lidera en términos de producción, que representa casi el 30% del total mundial, seguida por Estados Unidos y Medio Oriente con un 14% cada uno, e India con un 9%. Se estima que la producción mundial seguirá creciendo para satisfacer la demanda creciente y podría acercarse a 100 Mt. En términos generales, según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2024) el estado actual de la producción y demanda futura del H₂ es como muestra la figura 13.

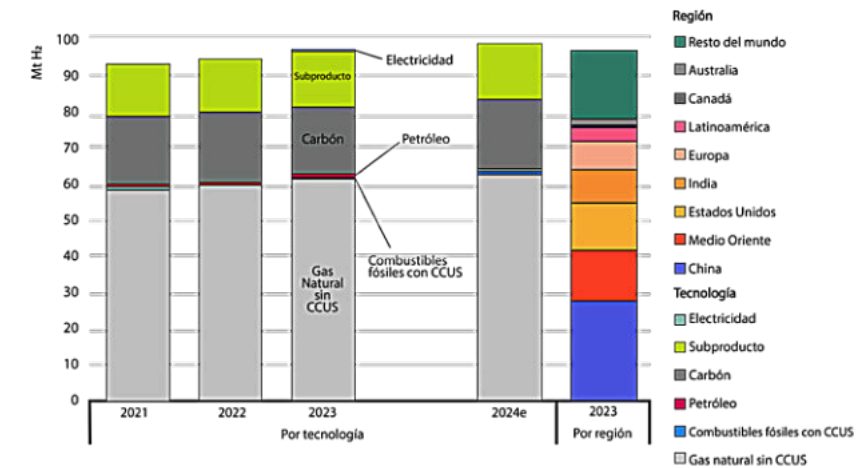


Figura 13. Producción de H₂ por tecnología y región 2021-2024. (IEA, 2024).

- La demanda global de hidrógeno alcanzó más de 97 Mt en 2023 y podría alcanzar casi 100 Mt en 2024. Sin embargo, este aumento debe verse como consecuencia de una mayor tendencia económica más que el resultado de una implementación exitosa de políticas.
- La demanda de hidrógeno sigue concentrada en aplicaciones industriales y de refinación donde se ha utilizado durante décadas. Su adopción en nuevas aplicaciones donde el hidrógeno debería desempeñar un papel clave es en la transición a la energía limpia y el transporte de larga distancia en donde representa menos del 1% del consumo mundial de la demanda, a pesar de un crecimiento del 40% en comparación con 2022. Figura 14.

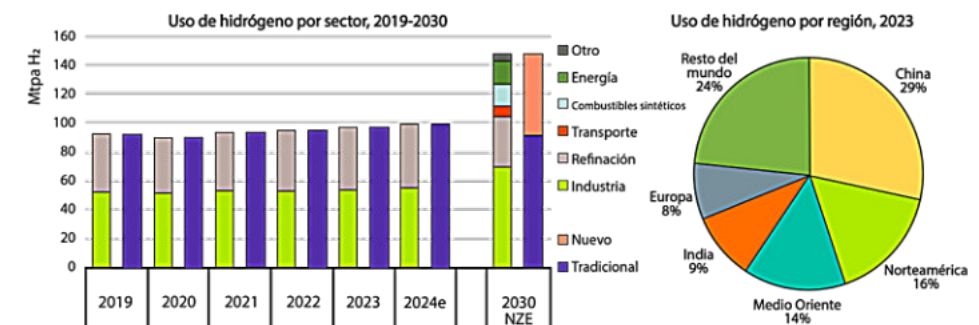


Figura 14. Demanda de H₂ por sector y región, escenario al 2030. (IEA, 2024).

- La demanda de hidrógeno de bajas emisiones creció casi un 10% en 2023, pero aún representa menos de 1 Mt. La acción gubernamental se ha intensificado recientemente, a través de

implementación de mandatos, esquemas de incentivos y herramientas de desarrollo de mercado. Esto podría aumentar la demanda a más de 6 Mt/año para 2030, aunque esto equivaldría a alrededor de una décima parte de las necesidades del Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050.

- Existen tendencias contrastantes en diferentes subsectores del transporte. En el transporte por carretera, el mercado se está desacelerando y la atención se está desplazando de los automóviles a los vehículos pesados. En transporte marítimo y aviación, el uso de hidrógeno y combustibles a base de hidrógeno está ganando interés, especialmente cuando existe apoyo político, aunque la penetración en el mercado es lenta.

En refinación

La demanda de hidrógeno en refinación alcanzó los 43 Mt en 2023, más de 1 Mt por encima del récord anterior de 2022. El crecimiento de la demanda se ha concentrado en China (+0,9 Mt) y Oriente Medio (+0,5 Mt), mientras que la demanda en todas las demás grandes regiones se mantuvieron en gran medida similares a 2022. El crecimiento de la demanda en China fue una consecuencia del cambio en la política gubernamental con respecto a la restricción de exportaciones y el levantamiento de las medidas relacionadas con la pandemia, lo que llevó a una demanda y un funcionamiento récord de las refinerías a principios de año. Sin embargo, Estados Unidos todavía representa la mayor parte de la demanda y aún se espera que procese más crudo que China hasta 2024, antes de ser superado.

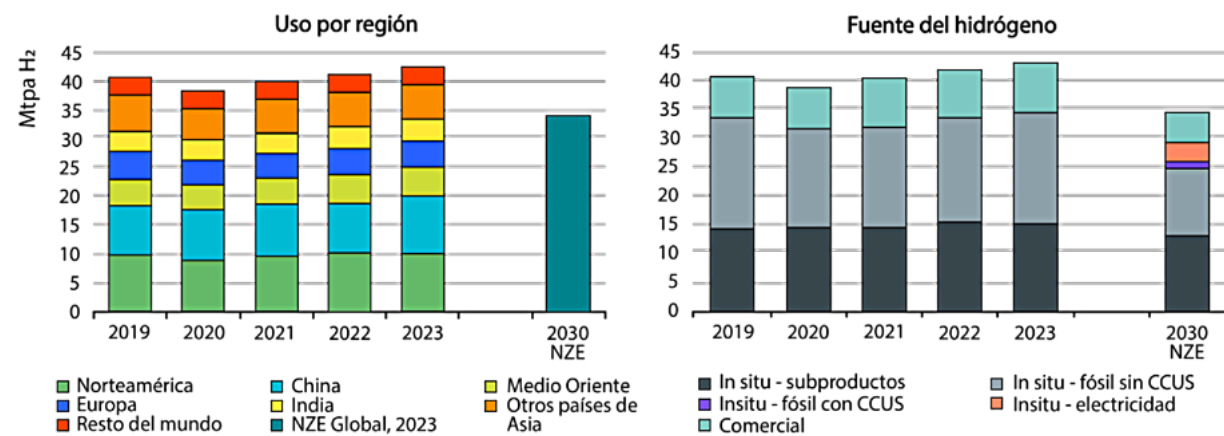


Figura 15. Uso de H₂ por región y proyección en refinación al 2030, histórico y en escenario net-cero. (IEA, 2024).

En Industria

La demanda mundial de hidrógeno en la industria alcanzó las 54 Mt en 2023, un aumento de casi 2% interanual. Alrededor del 60% de esta demanda fue para la producción de amoníaco, el 30% para metanol y 10% para DRI (*Direct reduction of iron ore*) en el subsector siderúrgico. La mayor parte del hidrógeno utilizado en la industria se produce a partir de combustibles fósiles no secuestrado en las mismas instalaciones donde se produce. La captura de carbono es una práctica común en algunos subsectores industriales, aunque la mayor parte de las 140 Mt/año de CO₂ capturadas se destinan a otros usos industriales en aplicaciones (como la producción de urea) y termina siendo liberado, con solo muy pocos proyectos que almacenan CO₂ geológicamente. Como resultado, la producción de hidrógeno en la industria fue responsable de alrededor de 680 Mt de emisiones directas de CO₂ en 2023, un aumento 0,6% a partir de 2022, aproximadamente igual a las emisiones totales de CO₂ de Turquía, por citar una referencia (IEA, 2024)

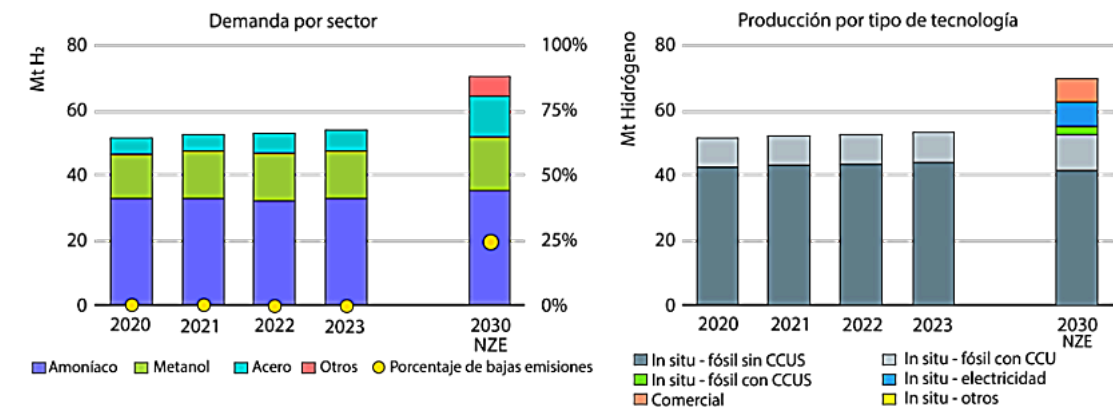


Figura 16. Uso del H₂ en el sector industrial y proyección al 2030, histórica y en escenario net-cero. (IEA, 2024).

En el Transporte

El uso del hidrógeno como medio de descarbonización del transporte por carretera sigue expandiéndose, aumentando más rápidamente en 2023 (alrededor del 55 %) que en 2022 (alrededor del 40 %) debido, en particular, al crecimiento de los camiones y autobuses pesados de celda de combustible en China. A pesar de ello, la demanda de hidrógeno en el transporte por carretera alcanzó solo 60 kt en 2023 (menos del 0,1 % de la demanda mundial).

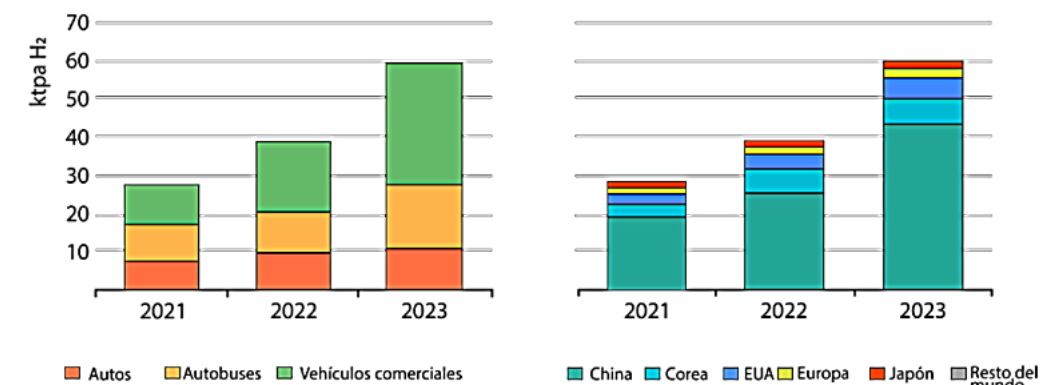


Figura 17. Consumo de H₂ en transporte de carretera por tipo de vehículo y región. (IEA, 2024).

En coches y vans Corea, Estados Unidos y Japón siguen liderando el despliegue de vehículos de celda de combustible con más del 50%, más del 25% y más del 10%, respectivamente, del stock mundial. Sin embargo, las ventas se han desacelerado en todas las regiones y el stock mundial aumentó apenas 15% entre 2022 y 2023,13 y menos del 5% desde finales de 2023 hasta junio 2024.

En cuanto a camiones de carga, son el sector de más rápido crecimiento para los vehículos de celda de combustible, y el stock ha aumentado más del 50% en 2023, más del doble de rápido que los autobuses y tres veces más rápido que los coches. En junio de 2024, el stock mundial asciende a más de 12 000, pero, como en 2022, alrededor del 95% de ellos se encuentran en China. Sin embargo, esto debería no ocultar el crecimiento sustancial observado tanto en Estados Unidos como en Europa, aunque desde una base inferior. A finales de 2022 había alrededor de 135 camiones de celdas de combustible en Europa, pero eso había aumentado a alrededor de 350 en junio de 2024. En los Estados Unidos, durante el mismo período, los camiones de celda de combustible aumentaron de sólo 10 a alrededor de 170. Por tanto, la proporción de camiones en la flota mundial de eléctricos con celda de combustible ha aumentado desde menos del 9% en 2021 a casi el 13% a junio de 2024.

En lo que corresponde a hidrolineras (HRS - H_2 Refuel Station)- , actualmente existen 1200 estaciones de repostaje de hidrógeno en funcionamiento en el mundo. Pero el total general creció solo marginalmente en 2024, ya que la apertura de nuevas estaciones se vio parcialmente compensada por el cierre de estaciones en todo el mundo y las HRS más antiguas fueron actualizadas o reemplazadas. Como en 2022, China tenía el mayor número de estaciones en 2023, con más de 400, seguida de Europa, con 280, Corea con 180 y Japón con más de 170. Por lo que corresponde al precio al público del H_2 para transporte, ver la figura 18.

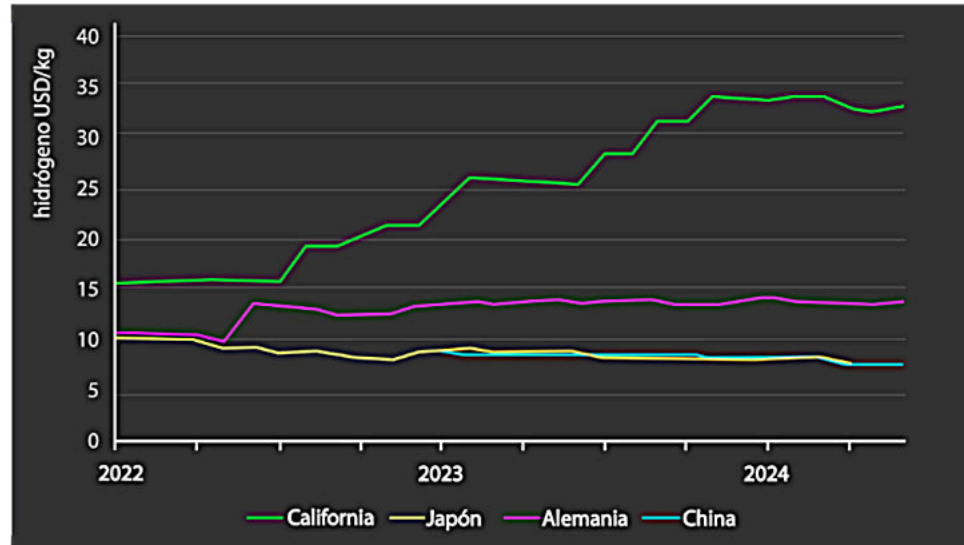


Figura 18 . Precio de H_2 para transporte en bomba al público. (IEA, 2024).

Los buques propulsados con metanol lideran el camino en términos de buques con combustibles alternativos (excluido el gas natural licuado), debido a su mayor valor tecnológico y preparación comercial y mayor facilidad de manejo en comparación con el amoníaco. Actualmente ya hay en funcionamiento alrededor de 50 buques preparados para metanol. Cerca de la mitad de los buques de metanol de combustible dual existentes son petroleros/químicos, pero alrededor de dos tercios de los buques propulsados por metano encargados para el futuro son buques portacontenedores.

Los buques propulsados por amoníaco se encuentran en una fase de desarrollo más temprana que los propulsados por metanol, con normas de seguridad para el uso de amoníaco como combustible para buques aún por establecerse . Si bien varias sociedades de clasificación han publicado orientación sobre el diseño y construcción de embarcaciones alimentadas con amoníaco, la OMI (Organización marítima Internacional) de seguridad para buques que utilizan gases u otros combustibles de bajo punto de inflamación aún no cubre el uso de amoníaco como combustible, aunque las directrices están a punto de finalizarse. Sin embargo, los motores alimentados con amoníaco que se han probado en aplicaciones marítimas y ya se están realizando pruebas en buques en planeación.

El uso directo del hidrógeno en aviones aún está en desarrollo y, dado que la industria tiene regulaciones estrictas, es probable que cualquier nuevo avión de hidrógeno pase mucho tiempo en la fase de demostración antes de ver su uso comercial. Uno de los aviones de hidrógeno más conocidos es el de los programas de desarrollo es Airbus ZEROe, que investiga el hidrógeno con celda de combustible, y en enero de 2024 abrieron un centro en Alemania centrándose en el almacenamiento y suministro criogénico de hidrógeno licuado. Airbus también se asocia con otras empresas que trabajan para avanzar en las celdas de combustible para su uso en la aviación. Sin embargo, la mayoría de los anuncios en este espacio provienen de empresas emergentes como Fokker, Next Gen, cuyo objetivo es construir aviones de cuerpo estrecho propulsados por hidrógeno licuado. Aunque todavía el negocio se encuentra en etapa de desarrollo, ZeroAvia ha demostrado suficiente progreso para generar pedidos para sus sistemas de propulsión basados en celdas de combustible, que actualmente apuntan a modernizaciones del tamaño de aviones de 10-20 y

En ferrocarriles se están probando con celda de combustible de hidrógeno en una amplia gama de entornos, y la revisión reciente incluye 15 pruebas de trenes de hidrógeno anunciadas entre 2018 y 2024 para evaluar su idoneidad para trenes locales (Japón), interurbanos (India) y de mercancías (Austria). Los trenes de hidrógeno también siguen batiendo récords de distancia recorrida en con una sola recarga – 2803 km frente a 244 km para una versión alimentada por batería, demostrando sus potenciales ventajas. Además, los operadores ferroviarios de Francia, Italia y Estados Unidos han realizado pedidos de trenes de celda de hidrógeno en 2023. Sin embargo, todavía existen importantes obstáculos para el hidrógeno en el ferrocarril, y muchos proyectos cancelados o que no logran avanzar.

En el sector residencial

La contribución del hidrógeno para satisfacer la demanda energética y apoyar la descarbonización en el sector residencial sigue siendo insignificante, sin cambios significativos hasta 2023. Electrificación, calefacción urbana y energías renovables distribuidas están muy por delante de las tecnologías del hidrógeno a la hora de satisfacer esta necesidad. Se espera que el papel del hidrógeno siga siendo marginal en el futuro, alcanzando sólo 20 ktpa para 2030 (0,002% de la demanda total de energía del sector), mientras que en el escenario net-cero, el uso global de hidrógeno cubre solo alrededor del 0,13% de la demanda total en edificios para 2030.

En la generación de electricidad

El uso de hidrógeno para la generación de electricidad representa actualmente menos del 0,2% del mix de generación global (no a partir de hidrógeno puro, sino más bien de gases mixtos que contienen hidrógeno procedente de la producción de acero, refinerías o plantas petroquímicas). El hidrógeno y el amoníaco pueden convertirse en una fuente importante de bajas emisiones y flexibilidad del sistema eléctrico y se encuentran entre las pocas opciones para proyectos a gran escala y almacenamiento de electricidad estacional. La contribución a la generación total de electricidad es, sin embargo, limitada en el escenario net-cero. El hidrógeno y el amoníaco en conjunto representarán menos del 2% de la generación mundial de electricidad en 2050. Existen varias opciones tecnológicas para utilizar gas rico en hidrógeno o incluso hidrógeno puro para la generación de electricidad (y calor combinado): celdas de combustible, combustión interna, motores y turbinas de gas. Desde septiembre de 2023, la empresa coreana Hanwha demostró la factibilidad de quemar 100% de hidrógeno en una turbina de gas de 80 MW, con emisiones de óxido de nitrógeno inferiores a 9 ppm sin tratamiento específico de gases de combustión. La participación en la combustión conjunta de hidrógeno se demostró en una central de 566 MW conectada a la red.

El interés por utilizar hidrógeno y amoníaco como combustibles en el sector energético continúa creciendo con varios proyectos anunciados en la región de Asia-Pacífico, Europa y América del norte. A corto plazo, el uso de hidrógeno y amoníaco puede reducir las emisiones de las plantas existentes, mientras que, a largo plazo, las plantas de energía que funcionan íntegramente a base de hidrógeno o amoníaco podrían aportar flexibilidad al sistema eléctrico, en combinación con el almacenamiento de hidrógeno a gran escala.

A finales de 2023, la capacidad eléctrica instalada mundial utilizando hidrógeno y amoníaco totalizó alrededor de 330 MW, de los cuales Asia-Pacífico representó más del 50%, seguido por América del Norte con alrededor del 30% y Europa con el 15%. Basados en los proyectos anunciados, la capacidad de energía utilizando hidrógeno y amoníaco podría alcanzar los 7 100 MW para 2030. En comparación con la capacidad correspondiente identificada en lo reportado para 2023, esto representa un aumento del 24%. Casi la mitad de lo anunciado se ubica en la región de Asia y el Pacífico, seguida de Europa, lo que representa alrededor del 40% de la capacidad anunciada para 2030.

En lo que respecta a las tecnologías, la capacidad existente alimentada por hidrógeno está dominada por celdas de combustible, que representan el 60% de la capacidad instalada, mientras que las turbinas de gas

y el resto corresponde a turbinas de gas de ciclo combinado. Considerando lo anunciado en proyectos en planeación, las turbinas de gas y en ciclo combinado alcanzan una participación de dos tercios en 2030. La combustión conjunta de amoníaco en las centrales eléctricas de carbón es hoy en día limitada a unas pocas pruebas, pero podría representar alrededor del 15% de la capacidad anunciada para 2030, con nueve proyectos en desarrollo en la región de Asia-Pacífico. La capacidad mundial alimentada con hidrógeno y amoníaco de los proyectos anunciados representa casi una cuarta parte de la capacidad instalada desplegada en el Escenario de Compromisos para 2030 (30 GW), pero solo el 6% de la capacidad en el escenario net-cero (120 GW)

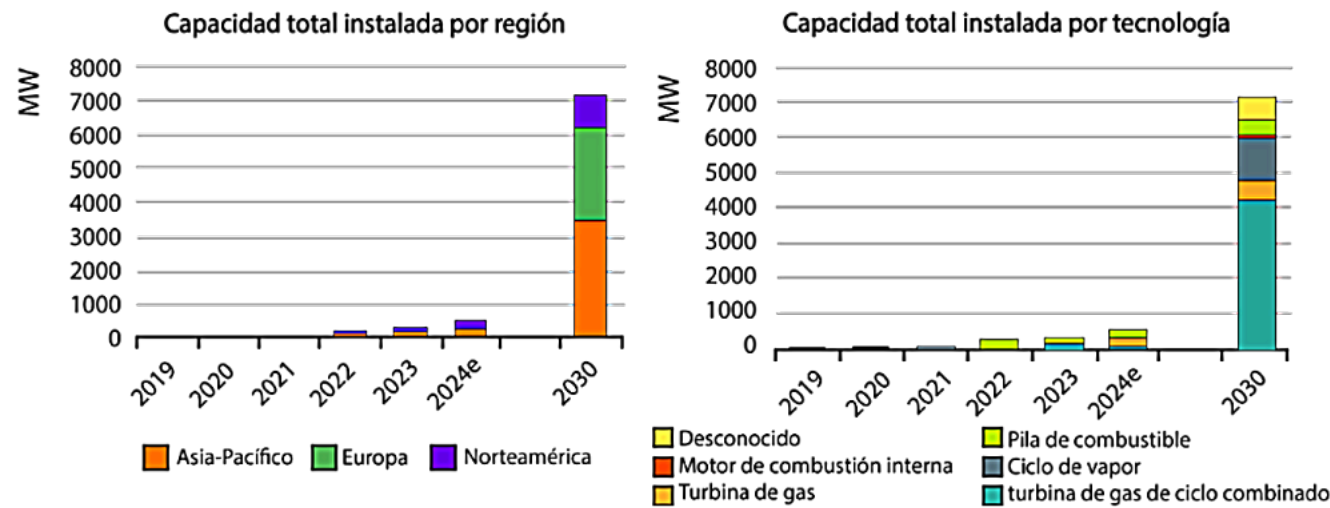
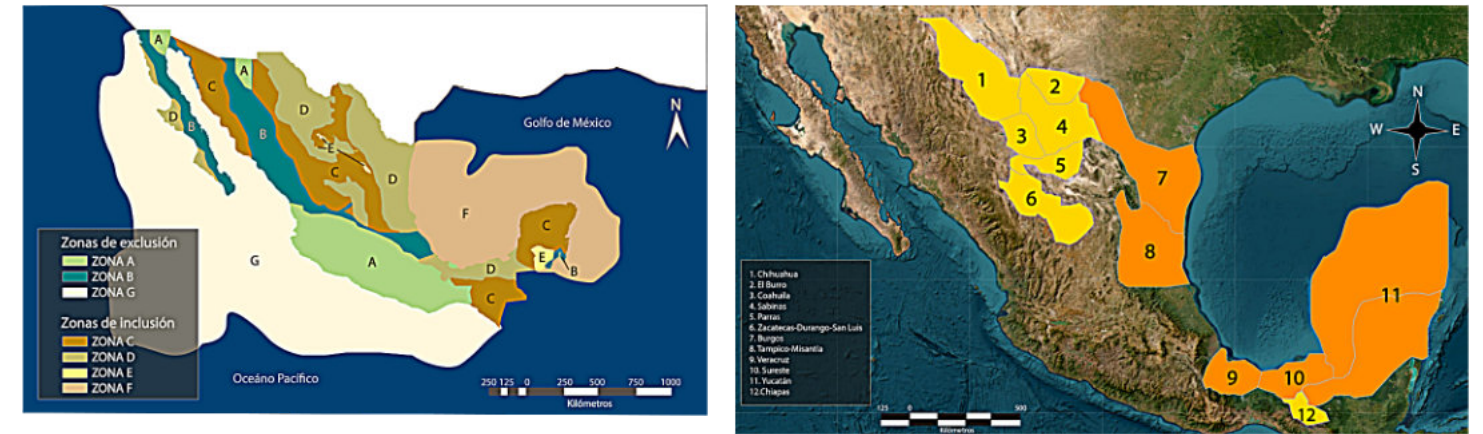


Figura 19 Generación de electricidad con H₂ y amoníaco por región, histórico y planeado. (IEA, 2024).

OPORTUNIDADES DE ALMACENAMIENTO DE H₂ EN MÉXICO

En México no existen aún almacenes de H₂ ni proyectos para su construcción; sin embargo, de decidirse la planeación de alguno(s) de ellos no se partiría de cero al menos en el conocimiento del subsuelo como reservorio comercial, ya que se podrían aprovechar los estudios que se han realizado para CCS (almacenamiento geológico de carbono) y de gas natural, tanto en yacimientos de hidrocarburos, acuíferos salinos y domos salinos.

A partir de 2010 se llevaron a efecto diferentes estudios encaminados a conocer el potencial de almacenamiento geológico de CO₂ y se concretaron algunos resultados importantes como un primer inventario de regiones con potencial (zonas de inclusión) para almacenar carbono en acuíferos salinos. Dichas regiones se describen en el Atlas de Almacenamiento Geológico de CO₂, México. (Jimenez, Davila, Arevalo, Medina, & Castro, 2012). Aunque ya ha quedado claro que la orientación de un secuestro geológico de carbono es con fines ambientales y por lo tanto, permanente, la física del sustrato geológico ya estudiado puede ofrecer conocimiento a partir del cual partir para buscar sitios más específicos según convenga para almacenar temporalmente H₂. En la figura 20 se muestran las zonas de inclusión y las cuencas con una primera estimación de capacidad de almacenamiento de CO₂, que desde luego debería ajustarse a los parámetros físicos del H₂. De acuerdo a Wenceslao, 202, habría que aumentar 30% más de masa de H₂ respecto a la estimada para CO₂.



Estimación de recursos de almacenamiento de CO ₂ para formaciones salinas en provincias/sectores geológicos evaluados en México			
Provincia geológica	Secuencia sedimentaria	Potencial teórico de almacenamiento (Gigatoneladas)	Sectores evaluados
Chihuahua	Carbonatos	<1	5
Coahuila	Carbonatos	6	10
	Terrigenos	7	2
Central	Carbonatos	<1	1
Burgos	Terrigenos	17	31
	Carbonatos	3	4
Tampico-Misantla	Terrigenos	7	8
	Carbonatos	1	5
Veracruz	Terrigenos	14	16
	Carbonatos	24	17
Sureste	Terrigenos	4	2
	Carbonatos	10	5
Yucatán	Terrigenos	6	5
	Carbonatos	—	—
Total (México)		100	111

Figura 20. Zonas de Inclusión y provincias con potencial de almacenamiento de CO₂ en acuífero salino profundo y una primera estimación de capacidad. (Jimenez, Davila, Arevalo, Medina, & Castro, 2012).

De igual forma, se han llevado a cabo diversos estudios con miras a almacenar CO₂ en yacimientos de hidrocarburos que podrían servir para conocer algunos de los parámetros necesarios para estimar capacidad de almacenamiento de H₂. Si bien, estos estudios han sido para almacenar CO₂ en procesos asociados a recuperación mejorada de hidrocarburos (EOR-CCS) pues se trata de yacimientos maduros, no precisamente exhaustos, se trata de algunos de los yacimientos más próximos a serlo. Por otra parte, la política de la compañía de Estado encargada de la explotación de hidrocarburos (PEMEX) considera que no tiene campos exhaustos dentro de sus activos, esto es más una política que una realidad, pues existen varios campos a los que alcanzará el tiempo de las energías renovables y habrá que renunciar a explotación por no ser los más atractivos. En la figura 21 se citan algunos de los principales campos estudiados con enfoque EOR-CCS y la capacidad de almacenamiento de CO₂ que se les ha estimado.

solubles e insolubles, no debe ser mayor al 10%, ni registrar horizontes de más de 5 m". (Hernández Mendoza, 2007)

CONCLUSIONES

De acuerdo con el grupo de trabajo para el almacenamiento geológico del hidrógeno (TCP-Task 42, 2022) las conclusiones más importantes que se distinguen respecto de la tecnología son:

- Los procesos e impactos críticos (como las reacciones biogeoquímicas, el flujo y la migración de hidrógeno, los procesos termodinámicos y el comportamiento mecánico de las rocas) se han estudiado a partir de experimentos de laboratorio aislados y modelos numéricos. Solo existen unos pocos laboratorios de hidrógeno (principalmente en Europa) que han publicado datos experimentales con hidrógeno a presiones y temperaturas relevantes para el subsuelo. Para facilitar más experimentos con hidrógeno en todo el mundo, es crucial establecer protocolos de laboratorio y plataformas de datos de referencia disponibles públicamente. También hay muy poca información pública sobre la inyección y extracción de hidrógeno en subsuelo. Las experiencias de AGG⁶ solo pueden extrapolarse a AGH en cierta medida, debido a las características físicas y químicas muy diferentes del hidrógeno frente al gas natural y el metano. Sin embargo, desde perspectivas geomecánicas, la tecnología AGH puede beneficiarse de las experiencias de AGG tanto en cavernas como en yacimientos de roca porosa.
- Los yacimientos porosos revelan una enorme variación en sus características geológicas locales (por ejemplo, profundidad, forma, tipos de roca, fluidos, fallas, comportamiento mecánico, composición de la sobrecarga), las experiencias no pueden transferirse simplemente de un lugar a otro. Por lo tanto, los proyectos iniciales de AGH tendrán que lidiar con incertidumbres sustanciales que se propagan a muchos factores de riesgo, desde los operativos hasta los económicos y de seguridad del proyecto.
- El monitoreo del comportamiento del hidrógeno en el subsuelo aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo. Algunas técnicas se encuentran en niveles bajos de NMT⁷ y deben probarse en un entorno subterráneo real. La falta de observaciones y mediciones in situ del subsuelo dificulta la validación y la correspondencia de los modelos numéricos, que tampoco están completamente desarrollados todavía. En consecuencia, los resultados de dichos modelos pueden ser muy inciertos, lo que genera mayores riesgos operativos, económicos y de seguridad.
- Ciertos aspectos de costos del desarrollo y las operaciones del AGH todavía son inciertos, si bien pueden tener un impacto importante en el CAPEX y OPEX del proyecto. Algunos ejemplos son los costos del gas de colchón, el tratamiento y mantenimiento del gas, además de las reparaciones de instalaciones y pozos.
- En ausencia de experiencias prácticas con el AGH en un entorno subterráneo real, puede haber incertidumbres significativas con respecto al desempeño de la inyección/extracción y la calidad y recuperabilidad del hidrógeno, lo que se traduce en una alta incertidumbre del OPEX del proyecto.
- Los riesgos a menudo se abordan únicamente de forma individual y cualitativa (por ejemplo, causas, procesos). No existe todavía una base de conocimiento e información de dominio público integral y confiable para una cuantificación completa y confiable de los riesgos.

⁶ AGG es Almacenamiento Geológico de Gas

⁷ NMT es Niveles de Madurez Tecnológica

REFERENCES

1. Abdin, Z. T. (2021). *iScience*, 24, 102966, (<https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102966>).
2. Africa Hydrogen, H. (2022). Ten colors of hydrogen. www.africahydrogenhub.net.
3. Aftab, A., Hassanpouryouzband, A., Xie, Q., Machuca, L. L., & Sarmadivaleh, M. (2022). Toward a Fundamental Understanding of Geological Hydrogen Storage. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, <http://hdl.handle.net/10754/675545>.
4. Aliakbar Hassanpouryouzband, K. A. (2022). Geological Hydrogen Storage: Geochemical Reactivity of Hydrogen with Sandstone Reservoirs. *ACS Energy Letters*(ACS Energy Lett. 2022, 7, 2203–2210).
5. Anna, L. S. (2020). Geologic Storage of Hydrogen. Sandia National Laboratories DOE.
6. Bloomberg. (2023). Bloomberg Línea. Obtenido de <https://www.bloomberglinea.com/latinoamerica/mexico/exclusiva-pemex-ya-almacena-gas-estrategico-en-cavernas-de-mexico-dice-cenegas/>
7. Bourgeois, J. P., Aupaix, N., Bloise, R., & Millet, J. L. (1979). Proposition d'explication de la formation d'hydrogène sulfuré dans les stockages souterrains de gaz naturel par réduction des sulfures minéraux de la roche magasin. *l'Institut Français du Pétrol*.
8. Chabab, S. T. (2020). Measurements and predictive models of high-pressure H₂ solubility in brine (H₂O + NaCl) for underground hydrogen storage application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.192>.
9. CIESAS. (2005). El plan integral del Istmo de Tehuantepec: ¿Un proyecto postergado? Obtenido de <http://www.ciesasgolfo.edu.mx/istmo/doc>.
10. Gelman, S. H. (2025). Prospectivity mapping for geologic hydrogen (ver. 1.2, January 22, 2025). (<https://doi.org/10.3133/pp1900>).
11. Gonzalez Huerta Rosa de Guadalupe, R. S. (2023). Almacenamiento de Energía: Hidrógeno-Baterías, hacia la independencia energética. *Sociedad Mexicana del Hidrógeno*.
12. Hernández Mendoza, C. E. (2007). Disposición de residuos peligrosos en cavidades geológicamente estables. Tesis de Maestría. UNAM.
13. IEA. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*. IEA, Clean Energy Ministerial.
14. Iglauer, S. (2022). Optimal geological storage depths for structural H₂ geo-storage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
15. Jimenez, O., Davila, M., Arevalo, V., Medina, E., & Castro, R. (2012). Geological Carbon Dioxide Storage in Mexico. A first Approximation. *International Journal of Physical Sciences*.
16. Johansson Fredric, D. J. (2018). Investigation of research needs regarding the storage of hydrogen gas in lined rock caverns. KTH Royal Institute of Technology, Sweden.
17. Kenning J. J., M. P. (2020). Regional thermal maturity modelling of hydrocarbons along the deep-water Yucatan margin, southern Gulf of Mexico. University of Texas. Geological Society of London.
18. Mingxing Bai, K. S. (2014). An overview of hydrogen underground storage technology and prospects in China. *Journal of petroleum science and engineering*.

19. Miocic Johannes, H. N. (21 de nov de 2023). Underground Hydrogen storage: a review. Energy and Sustainability Research Instit, <https://www.lyellcollection.org>.
20. Moyado-Tirado, G. (2018). Ingeniería básica de un sistema de almacenamiento de hidrógeno en cavernas salinas para el almacenamiento de energía en el sector eléctrico.
21. Nasiru Salahu Muhammeda, B. H.-A. (2022). A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. Energy Reports.
22. Omar Maiga, E. D. (2023). Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali. Nature, www.nature.com/scientificreports.
23. P. G. Haddad, M. R.-P.-M.-P. (2022). Geological storage of hydrogen in deep aquifers – an experimental multidisciplinary study. Energy & Environmental Science, DOI: 10.1039/d2ee00765g.
24. Rodriguez Moreno, V. (2020). Estimación preliminar de la capacidad de almacenamiento geológico de CO2 en campos maduros de México con oportunidad de Recuperación Mejorada.
25. TCP-Task 42, I. i. (Enero de 2022). International Energy Agency's Hydrogen Technology Collaboration Programme (TCP).
26. Wenceslao, M. d. (2021). Almacenamiento de Hidrógeno en España. Revista de la Sociedad Geológica de España.
27. Yang, J. H. (2025). Green Hydrogen Production by Water Electrolysis. CRC Press .
28. Yin, L. a. (2020). Review on the design and optimization of hydrogen liquefaction processes. Frontiers in Energy, 14, 530–544, <https://doi.org/10.1007/s11708-019-0657-4>.

Moisés Dávila Serrano

Se ha desempeñado desde 1980 realizando estudios de ingeniería geológica. Es ingeniero geólogo con maestría en ingeniería y doctorado en ciencias.

Es autor de libros técnicos sobre Ingeniería Geológica y Geología Ambiental, mientras que en el campo literario ha publicado novelas con la intención de crear conciencia de sostenibilidad a la vez que divulgar las ciencias de la tierra.

Es académico titular en la Academia de Ingeniería desde 2011, en donde presidió la Comisión de Especialidad de Ingeniería Geológica durante el biénio 2016 -2018.

Actualmente es catedrático de las asignaturas de Geología Aplicada a la Ingeniería Civil y Proyectos de Ingeniería Geológica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y Consultor Independiente en Ingeniería Geológica y Almacenamiento Geológico de CO₂.

Más detalles en: <https://www.moisesdavila.com/>

Cristian Martín Amezcua Meléndez

Es un brillante y talentoso joven nacido hace 22 años en Bogotá, Colombia. Recién terminó la licenciatura de Ingeniería Geológica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en donde se desempeña como ayudante de cátedra de medio tiempo y participa en proyectos de Sistemas de Información Geográfica e Hidrogeología.

GEOMITOLOGÍA

¿Una conexión entre el Diluvio Universal, la desaparición de Doggerland y la Atlántida?

JHONNY E. CASAS

Escuela de Geología, Minas y Geofísica y Escuela de Petróleo, Universidad Central de Venezuela



MITOS

Los mitos han alimentado la imaginación y el alma de los humanos por miles de años. Dichos mitos tradicionalmente han sido estudiados por personas entrenadas en artes ya que siempre se han enfocado en su significado religioso, psicológico o de cualidades literarias. Desde este punto de vista los mitos lucen en contraposición a la visión del mundo científico moderno. En un sentido más extremo mitos son historias contadas por ignorantes acerca del mundo como lo ven o pensamientos acerca de realidades que trascienden. Tal vez esta aparente tensión entre ciencia y mitos no existió para los autores de dichos mitos. Es posible que fueran personas inteligentes y observadoras tratando de darle un sentido al mundo que los rodeaba. Describiendo eventos desde su punto de vista y que de ninguna manera signifique que no fueran eventos reales. Los mitos han alimentado la imaginación y almas de los humanos por miles de años. La vasta mayoría de estos cuentos son solo historias que la gente ha pasado de generación en generación. Pero algunos de ellos tienen raíces en eventos geológicos reales y han sido usados como advertencias del peligro que representa el

poder de nuestro planeta. Bajo este concepto, se examinarán tres de los mitos más importantes en la historia de la humanidad y su posible relación con eventos geológicos.

GEOMITOLOGIA

El término Geomitología fue acuñado en 1968 por la geóloga Dorothy Vitaliano para describir el estudio de fenómenos naturales vía mitos o leyendas (VITALIANO 1968). Vitaliano concluyó que las tradiciones orales podían contener información genuina de eventos naturales basados en la observación de evidencia física. Algunos eventos geológicos como erupciones volcánicas, terremotos, impactos cósmicos, tsunamis, inundaciones y descubrimiento de fósiles han ocurrido en épocas recientes de la historia de la humanidad, pero a veces son difíciles de seguir en el record geológico. En estos casos, el volver a analizar e investigar mitos y folklore local puede potencialmente ayudar a entender procesos geológicos que ocurrieron antes de que la tecnología científica estuviera disponible para estudiarlos (VITALIANO 1968). Geomitología se define formalmente entonces como: El

estudio de los mitos que crearon diferentes culturas, para explicar múltiples eventos u observaciones de naturaleza Geológica, tales como terremotos, inundaciones, impactos extraterrestres, fósiles, y otros fenómenos naturales (CASAS 2024).

TIPOS DE GEOMITOLOGÍA

Dos tipos de geomititos han sido reconocidos por la famosa folklorista Adrienne Mayor (MAYOR 2004):

1. Explicaciones folklóricas a ciertas características geológicas.
2. Descripciones míticas de eventos geológicos catastróficos.

Se pueden encontrar numerosos ejemplos de mitos asociados a eventos geológicos, entre los cuales se pueden mencionar: Los antiguos griegos pensaban que los terremotos eran el resultado de Gigantes que trataban de escapar de sus encierros, a los cuales los había sometido Zeus, el padre de todos los Dioses del Olimpo. También asumían que los terremotos de gran magnitud, a veces acompañados de tsunamis, eran atribuidos a Poseidón, Dios del mar, el cual lograba estremecer los continentes e islas con su furia y su poder. Virgilio (70-19 a.C.) y Plinio el Viejo (23-79 d.C.) sugirieron que los Gigantes de un solo ojo (Cíclopes) personificaban a los Volcanes activos en el Mediterráneo, y que cuando luchaban entre si se producían terremotos volcánicos. El Monte Etna, el volcán mas activo de Europa, se decía que entraba en erupción cada vez que el ser mitológico Tifón, encerrado por el Dios Zeus, intentaba escapar de su prisión dentro de esa montaña.

Mitos de Destrucción

Los mitos de destrucción mas comunes están asociados a eventos tales como: grandes inundaciones, grandes terremotos, volcanes, incendios extensos, "El Cielo" cae sobre la Tierra. Dentro de los anteriores, el más extendido y conocido es el mito de grandes inundaciones o Diluvio Universal.

El Diluvio universal es el nombre de una inundación mundial relatada en textos de algunas antiguas culturas. Estos eventos de inundación ocurren a escala mundial y en diferentes culturas. Existen mitos y leyendas antiguas relacionadas con el tema han sido documentados en lugares tan variados como en Mesopotamia, Grecia, Egipto, India, China, las Américas y el Pacífico (WITZEL 2012). Algunas de estos mitos sorprendentemente parecen poseer factores en común. Entre ellos se pueden mencionar, anuncios celestiales

que son ignorados por la gente, la inundación en sí misma, la construcción de un gran barco o arca para preservar las formas de vida, y por último, la restauración de la vida en el planeta. Las 3 versiones más antiguas del Diluvio Universal son:

El Poema de Gilgamesh – Utnapishtim

Más antiguo que el Génesis es el poema épico babilónico de Gilgamesh. El poema fue escrito sobre tablillas de arcilla (Figura 1) durante el siglo VII a.C., y fueron descubiertas en la biblioteca del palacio del rey Asurbanipal, quien reinó el imperio asirio en la antigua ciudad de Nínive, en la orilla oriental del río Tigris, desde el 669 a.C. hasta el 631 a.C.



Figura 1. Undécima tablilla de la Epopeya de Gilgamesh que describe cómo los dioses enviaron un diluvio para destruir el mundo. <https://archaeology.org/issues/may-june-2016/collection/cuneiform-religion/>

Gilgamesh era el Rey de Uruk, que se embarcó en un viaje para encontrar el secreto de la inmortalidad. En su viaje, conoció a Utnapishtim, sobreviviente de una gran inundación, quien construyó un barco y salvó a su familia y amigos, así como a un grupo de artesanos, animales y metales preciosos. La historia de Utnapishtim aparece en otras obras de literatura babilónica pero el autor de Gilgamesh la usa como una historia dentro de su historia cuando Gilgamesh le pregunta cómo se volvió inmortal (VENTURA 2020). La narración cuenta que a Utnapishtim, hacía mucho tiempo, los dioses le habían dicho que iban a inundar el mundo y que debía construir una nave y embarcar en ella todas las semillas de la vida. Pasaron seis días y siete noches de tempestad y llegado el séptimo día se

apacó la tempestad y el mar se apaciguó. Cuando la lluvia cesó, cuenta Utnapishtim, abrió una escotilla y solo vio el mar. Todos los humanos habían perecido ... el silencio era total. La especie humana, toda, había vuelto al barroSe arrodilló y quedó ahí, llorando Tras enviar al séptimo día una paloma y luego una golondrina, regresaron al no encontrar dónde posarse, pero luego soltó un cuervo y al ver que no regresaba, y viendo que las aguas comenzaron a descender, dejó salir a todos del barco, que se había quedado encallado en el monte Nishir, e hizo una ofrenda a los dioses. Al llegar Enlil, el señor de los cielos y la tierra, se enfureció al ver la barca, pues ningún hombre debería haber sobrevivido al exterminio. Los otros dioses le reclamaron haber causado el diluvio. Tras reflexionar y antes de partir, Enlil convirtió a Utnapishtim y su esposa, en inmortales, semejantes a los dioses (SILVA 2000, VENTURA 2020).

La historia épica de Atrahasis

La historia épica de Atrahasis es la más completa narración acadia de una inundación, recobrada de la Antigua Mesopotamia. Esta contenida en fragmentos de tablillas recuperados también de la biblioteca del palacio de Asurbanipal en Nínive, y fueron identificadas como parte de una versión del relato del diluvio. El texto era bien conocido en la antigüedad, aunque aparentemente no tan popular como la versión de Gilgamesh. Es un extenso poema que abarca desde el origen del mundo, a la creación del hombre, incluyendo la narración del Diluvio, donde presenta muchas semejanzas y coincidencias con el poema de Gilgamesh.

Según las traducciones de los textos originales, efectuadas por LARA (2002) y McDONALD (2018), algunos de los párrafos más interesantes a destacar se encuentran en la parte final del texto, donde se explica que los dioses se rehúsan a trabajar más, por lo que crean a la humanidad para servirles, pero luego deciden que es demasiado ruidosa, así que ordenan destruirla. Uno de los dioses, Enki, advierte a Atrahasis en un sueño: Escucha mis palabras destruye tu casa para construirte barco ... abandona tus bienes terrenales y salva tu vida. Atrahasis, siguiendo las instrucciones del Dios Enki, construye su barco y lo llena con cada tipo de animal puro que pudo capturar, embarcando además a su familia. El diluvio comenzó y pasó su violencia sobre los hombres como si fuera una batalla siete días y noches prosiguieron las borrascas y las lluvias finalmente, el diluvio cesa y Atrahasis confirma que las aguas habían comenzado a bajar de nivel

desembarca y sirve una comida como sacrificio a los dioses. El Dios Enlil percibe el barco y se llena de rabia ... ¿Cómo ha podido sobrevivir un hombre a la mortandad? (los siguientes fragmentos del texto están perdidos) ...y luego continúa el texto ... los dioses acuerdan conceder la vida eterna a Atrahasis por ser el continuador de la especie humana.

El Arca de Noé y el Diluvio Universal - Génesis 6 y 7

En la conocida historia del Arca de Noé, común entre cristianos, judíos y musulmanes, narrada en el libro del Génesis, capítulos 6 y 7 (REINA-VALERA 1960), se cuenta como Dios emite su juicio contra la humanidad a causa de sus pecados y decide destruir la Tierra con una gran inundación y salvar solo a un hombre, el patriarca Noé y su familia. Bajo las ordenes de Dios, Noé construye un gigantesco barco, el Arca (Figura 2), y lo llenó con siete parejas de cada animal sobre la tierra. Una vez hecho esto, Dios cubrió la tierra con agua, ahogando todo lo que alguna vez estuvo sobre la faz de la tierra. Noé, su familia, y los animales del Arca, sobrevivieron y repoblaron la Tierra.



Figura 2. Representación del Arca de Noé

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ch%C3%A2teau_du_Lude_No%C3%A9_Lude.jpg

La historia es muy similar a otras historias de inundaciones que existen en diversas culturas, solo que sabemos que no existe suficiente agua en el sistema terrestre para cubrir todo el planeta. Sin embargo, diversos autores creen que la historia de Noé es el recuerdo de algún determinado lugar del planeta, que

sufrió una inundación extensa y permanente. Algunos geólogos piensan que la historia de Noé puede haber estado influenciada por un catastrófico evento que pudo haber ocurrido en la región del Mar Negro entre el 5.500-7.300 a.C. (RYAN et al. 1997).

LA TEORÍA DEL MAR NEGRO

Dos Geólogos del Lamont-Doherty Earth Observatory (Universidad de Columbia), William Ryan y Walter Pitman se preguntaron a finales de la década de los 90s, que podría explicar la abundancia de mitos de inundaciones en diversas culturas (WITZEL 2012). Después de mucho investigar, llegaron a proponer una teoría: Al finalizar la edad del hielo, los glaciares comienzan a derretirse, y una gran cantidad de agua del Atlántico entró por el Mar Mediterráneo, aumentando su nivel, lo que eventualmente ocasionó que se desbordara hacia el Mar Negro. Esta hipótesis, publicada por ambos autores luego de una expedición conjunta ruso-estadounidense (RYAN et al. 1997), fue usada por ellos como explicación del evento que dio origen al mito de Utnapishtim y subsecuentemente al de Noé y el Diluvio Universal.

Los estudios geológicos y paleontológicos efectuados en núcleos cortados por el buque ruso de investigación Aquanaut, bajo la dirección de Ryan, Pitman y C. Major (RYAN et al. 1997), revelaron que esta región fue una vez un lago mucho más pequeño, probablemente 100 m por debajo de su nivel actual. Los científicos encontraron conchas de moluscos en la parte inferior de los núcleos, pertenecientes a especies de agua dulce como *Dreissena rostriformis* y *Turricaspia caspia*, mientras que los moluscos que se encontraron en las capas superiores resultaron ser formas de agua salada, como *Mytilus galloprovincialis*, *Bittium reticulatum* y *Abra alba*, por lo que asumieron que se habían introducido cuando el Mar Negro fue inundado por agua salada. La datación de radiocarbono de las conchas de moluscos de agua dulce, realizadas con un Accelerator Mass Spectrometry (AMS) en las instalaciones del Instituto Oceanográfico Woods Hole dieron una cifra calibrada de 5.500 años a.C. (RYAN et al. 1997).

Las principales ideas para ese momento fueron las siguientes:

- Argumentaron que, durante la edad del hielo, el Mar Negro era un cuerpo de agua dulce y aislado, con un nivel entre 40 y 100 m por debajo del nivel de

Mediterráneo, rodeado de tierras fértiles que eran habitadas por una importante población.

- Hace unos 12.000 años hacia el fin de la era del hielo, la superficie de la Tierra comenzó a calentarse y vastas masas de hielo acumuladas en el hemisferio norte comenzaron a derretirse, lo que ocasiono que los océanos y los mares aumentaran de nivel.
- Repentinamente, entre 6.500 y 5.000 a.C., las aguas saladas del Mediterráneo entraron al Mar Negro a través de lo que hoy es conocido como el estrecho del Bósforo o estrecho de Estambul (Turquía).
- El agua pudo haber penetrado a través del estrecho del Bósforo con una fuerza equivalente a varias veces las Cataratas del Niágara. Cada día el Mar Negro como consecuencia de lo anterior, pudo haber aumentado su nivel entre 15 y 20 cm diarios, inundando las costas y las poblaciones adyacentes.
- Se calcula que el evento pudo haber inundado 155.000 km² de terreno y expandir significativamente el Mar Negro hacia el norte y el oeste.
- En la memoria de los aterrados moradores de la región, la historia de la inundación paso de generación en generación y eventualmente pudo haberse convertido en la historia de Noé y el Diluvio Universal de otras culturas.

Geológicamente hablando, hace aproximadamente 12.000 años el Mar Negro era un lago de agua dulce separado del Mar Mediterráneo por el alto estructural del Bósforo (Figura 3). Debido a ello, el Mar Negro era entre 40 y 95 m más bajo que el Mediterráneo actual (Figura 3). Cuando la era del hielo llegó a su fin (aproximadamente entre 8.000 y 10.000 a.C.) y se aceleró el derretimiento de los glaciares, los mares comenzaron a aumentar de nivel, llegando el momento donde el agua del Mediterráneo comenzó a verterse sobre el Mar Negro (Figura 3), provocando la inundación que se asocia con la historia de Noé y el Diluvio Universal. La evidencia geológica y arqueológica sugiere que la inundación del Mar Negro efectivamente ocurrió. Estudios patrocinados por la UNESCO-IGCP Project 521, entre el 2005 y el 2009, sugirieron también que la inundación descrita en la Sagrada Biblia Cristiana (Génesis 6 y 7), y en los relatos épicos de Babilonia y Mesopotamia, ocurrieron muy probablemente en el Mar Negro.

Seguendo las ideas generadas por Ryan y Pitman, el oceanógrafo Robert Ballard (el mismo cuyo equipo localizo el Titanic), trabajando en esa época para la Woods Hole, lideró una expedición al Mar Negro en

1999, donde encontró evidencias de una antigua línea de costa en las profundidades de dicho mar. BALLARD et al. (2001) y su equipo de arqueólogos marinos, identificaron a unos 20 km costa afuera de Turquía, estructuras hechas por el hombre como casas y otras estructuras en madera, así como vasijas y conchas de agua dulce, indicando antiguas líneas de costa a profundidades cercanas a 100 m por debajo del nivel actual del Mar Negro (Figura 4). Inmediatamente, la comprobación de la hipótesis de una gran inundación del Mar Negro, supuso un verdadero shock para la comunidad científica de la región, sobretudo entre los geólogos y arqueólogos búlgaros los cuales, por razones desconocidas, la recibieron con gran hostilidad. La anatematización estuvo acompañada de una feroz campaña mediática, a raíz de la cual el Dr. Robert Ballard, abandonó Bulgaria muy decepcionado.

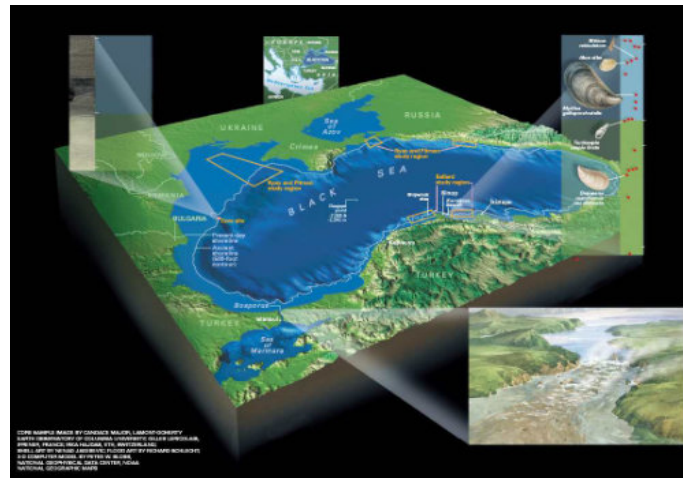


Figura 4. Mapa del Mar Negro que muestra varias áreas de estudio, la delineación de la costa sumergida y el estrecho del Bósforo. (Centro Nacional de Datos Geofísicos, NOAA, National Geographic Maps).

<https://geologicalmanblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/09/mar-negro.jpg>

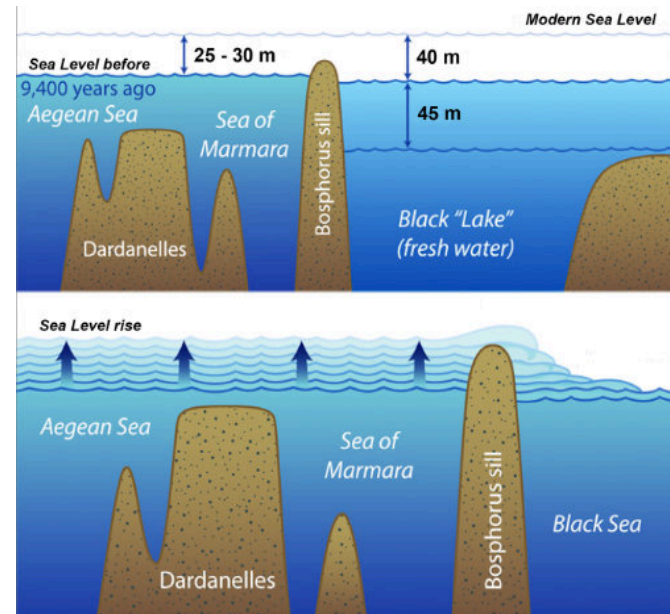


Figura 3. Esquema de la relación entre el Mar Negro y el Mar Mediterráneo (Egeo + Marmara), antes y durante la inundación. Modificada de

<https://www.whoi.edu/multimedia/noahs-not-so-big-flood/>

Algunos años antes, en julio de 1985, un equipo de arqueólogos marinos dirigidos por P. Dimitrov, a bordo del buque de investigación soviético Rift y usando el sumergible Argus, investigaron una zona del Mar Negro, a unos 100 m de profundidad y ubicada a unos 50 Km al este de Varna (Bulgaria). El equipo de científicos identificó estructuras interpretadas como hechas por el hombre; así como restos de vasijas, todos hallados en un rango de profundidad entre 90-100 m (DIMITROV 2003).

También, durante el mismo estudio en busca de rastros de asentamientos a lo largo de la periferia de la plataforma y dentro de la antigua zona costera, donde el espesor de los sedimentos recientes es pequeño, el brazo mecánico del sumergible Argus se encontró un curioso objeto que una vez recuperado, fue denominado "El Plato de Noé" (Figura 5). DIMITROV (2003) describe en su cuaderno de anotaciones dicho descubrimiento con las siguientes palabras: "Nos sorprendió ver un objeto con contornos oscuros en la arena, en lugar de una roca redondeada. El brazo mecánico tomó el objeto que parecía un plato ligeramente dentado en un extremo. Después de varios intentos, el objeto fue extraído de la arena y puesto en la caja de muestras. Teníamos prisa por sacar a la superficie el precioso hallazgo. Cuando subió a bordo, el Plato de Noé como lo denominamos, cayó en manos del impaciente grupo que lo miraba con gran interés". En el lado exterior del recipiente, había caracteres escritos, con coincidencias similares a la escritura sumeria y al famoso sello de Karanovo encontrado en Bulgaria y datado alrededor del 6.800 a.C. (DIMITROV y DIMITROV 2005).

Investigaciones adicionales respaldaron muchas de estas hipótesis. En particular, R. Ballard y F. Hiebel este último, arqueólogo de la Universidad de Pensilvania, investigaron la supuesta costa antigua utilizando un dispositivo robótico llamado Little Hercules (ya que los buzos no podían operar a tales profundidades), cerca de Sinop, en la parte central de la

costa sur del Mar Negro. BALLARD et al. (2001) reportaron haber identificado una estructura de madera y piedras que tenía lados en ángulo recto con respecto a otros, lo que generalmente se considera un signo característico de una construcción humana. Parecía que habían descubierto mas pruebas de ocupación humana en las orillas del lago de agua dulce, un elemento clave de la hipótesis original de Ryan y Pitman. En las conclusiones de su trabajo de investigación, BALLARD et al. (2001) dicen con respecto a la descripción del lugar arqueológico #82: "la apariencia del sitio y la composición de sus sedimentos tienen similitudes con estructuras conocidas en el norte de Turquía pertenecientes al período Neolítico".

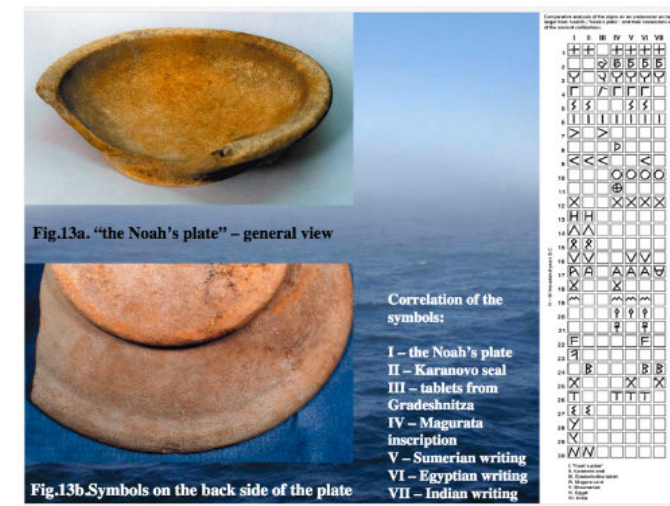


Figura 5. El plato de Noé. Vista principal (arriba), y símbolos en la parte exterior del plato (abajo). Comparación de los símbolos con escrituras antiguas conocidas. Dimitrov (2003).

Luego de la datación original de RYAN et al. (1997), RYAN et al. (2003), cambiaron algunos de sus puntos de vista sobre los detalles del escenario que habían propuesto originalmente en colaboración con Pitman. En particular, dado que se había establecido que las proporciones de isótopos de estroncio son diferentes en ambientes marinos que en los de agua dulce, RYAN et al. (2003) quedaron convencidos mediante nuevas mediciones de relaciones 87 Sr/86 Sr en conchas fósiles, que la catastrófica irrupción del Mediterráneo en el Mar Negro comenzó más tarde, alrededor del 7.400 a.C. Evidentemente, los efectos en la vida marina estuvieron lejos de ser instantáneos, y las especies de moluscos de agua dulce continuaron predominando, sobre todo en las desembocaduras de los ríos y deltas, hasta que se alcanzó un umbral, lo que muy posiblemente ocurrió en el 5.500 a.C., edad datada con radiocarbono en moluscos de vida marina que fueron muestreados,

datos y reportados originalmente por RYAN et al. (1997).

Estudios posteriores efectuados por DIMITROV y DIMITROV (2005) y DIMITROV et al. (2005), patrocinados por UNESCO-IGCP Project 521, y en desacuerdo con las edades anteriormente mencionadas, estimaron que la irrupción en el Mar Negro podría haber ocurrido mucho más temprano, entre el 5.500 y 5.600 a.C. Asumiendo un aumento extremadamente rápido del nivel del mar, DIMITROV y DIMITROV (2005) también estimaron que el área de inundación pudo haber alcanzado los 160.000 km² en corto tiempo, destruyendo asentamientos de las primeras civilizaciones alrededor de las costas del Mar Negro. En aquella época los indoeuropeos se asentaban en dicha región, y es altamente probable que las inundaciones catastróficas ocasionaran su migración y separación en grupos tales como las tribus alemanas, tracias, ilirias, griegas, y arrianas (SHOPOV et al. 2009).

Efectivamente, esta catástrofe pudiese haber disparado la gran migración Indo-Europea, y no es sino hasta unos 1.000 años después, que nuevamente se registran signos arqueológicos de actividad humana cerca de las nuevas costas. Sin embargo, este último punto aún se continúa debatiendo, incluso algunos autores en contraposición, ponen en duda la existencia de algún cambio importante en la forma de subsistencia o comportamiento de los grupos humanos de la región (YANKO-HOMBACH et al. 2007), para el periodo de tiempo en cuestión.

La figura 6a muestra una sección estratigráfica publicada por GIOSAN et al. (2008) en el delta de Danubio, el cual desemboca en el Mar Negro. En la sección se muestran los depósitos basales lacustres de aguas dulce, y sobre ellos las progradaciones del Danubio sobre el nuevo espacio de acomodación creado por el aumento relativo del nivel de las aguas, producto de la inundación (Figura 6a). Basado en estos datos y desde la perspectiva de la evolución del delta del Danubio, GIOSAN et al. (2008) proponen que la subida del nivel del Mar Negro en esta región fue de unos 30 m, muy inferior a la propuesta por otros autores como YANCHILINA et al. (2017), quienes proponen que fue de hasta 120 m. Estos últimos autores descartan la cifra de GIOSAN et al. (2008) alegando que los núcleos demuestran que el delta del Danubio comenzó a progradar en esta área cuando el

nivel del mar alcanzó los 35 m por debajo del actual nivel.

También en la misma figura 6, se observan unas imágenes mostrando fósiles con el tipo de moluscos encontrados en los sedimentos y como se observa el cambio de especies de aguas dulces a especies de aguas saladas más arriba (Figura 6b). En la misma figura 6c se observan fotos de un núcleo tomado en la plataforma continental de Rumania (DIMITROV y DIMITROV 2004) que muestra el posible contacto entre los sedimentos de aguas dulces que prevalecieron por miles de años en el Mar Negro y el nuevo ciclo marino que dura hasta hoy día, con sedimentos producto de la irrupción del Mediterráneo (RYAN et al. 2003, DIMITROV y DIMITROV 2004).

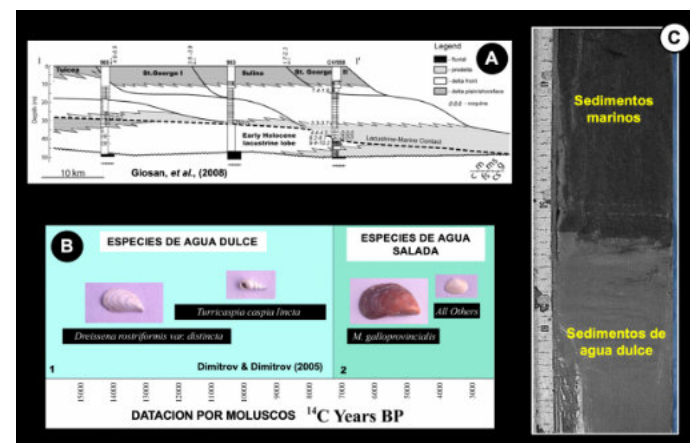


Figura 6. A. Sección geológica a través del delta del río Danubio progradando sobre el Mar Negro (modificado de Giosan 2008). B. Cambio abrupto de especies de moluscos de aguas dulces a aguas saladas (modificado de Dimitrov et al 2004). C. Núcleo tomado en la plataforma continental de Rumania que muestra el cambio de facies de sedimentos de aguas dulces a sedimentos depositados en aguas saladas. Modificado de Dimitrov & Dimitrov, 2005

¿Cuánto tiempo habría tardado en subir la superficie del Mar Negro hasta equilibrarse con el nivel del Mediterráneo, una vez que comenzó la inundación?. RYAN et al. (2014), calculó que el volumen de agua necesario para llenar el Mar Negro desde por lo menos su isóbata de -90 m hasta la de -20 m, fue de aproximadamente 3×10^4 km³. Utilizando la tasa de flujo calculada por SIDDALL et al. (2004), el resultado indica que la duración habría sido del orden de 15 a 20 años y tal vez un poco más si se añade el tiempo que tomó para convertirse en una corriente con poder de erosión. Este cálculo es apenas un poco más largo que

la duración original de cinco años estimada por RYAN et al. (1997).

En el trabajo de DIMITROV (2010), los argumentos científicos más significativos en apoyo de la teoría del evento geocatastrófico del Mar Negro fueron:

- Presencia de una antigua costa en la periferia de la plataforma que existía alrededor de 7.500-6.500 a.C., actualmente a profundidades de entre 90 y 120 m.
- La existencia de un tipo catastrófico de sedimentos minerales organógenos de aguas profundas (sapropeles), producto de la abrupta inundación.
- La sustitución de la macro y microfauna del lago de agua dulce que existía hace más de 8 mil años, por comunidades bióticas típicamente marinas
- Restos de antiguos asentamientos neolíticos y neópolis, en la zona de las antiguas costas a profundidades de 90 a 120 m
- El “plato de Noé”, un artefacto controvertido y probablemente único hasta ahora, que podría haber servido como utensilio funerario y de culto, o para fines domésticos. Los signos en el “plato de Noé” pueden llegar a ser los mensajes escritos más antiguos de la época anterior al “Diluvio Universal”.
- Presencia de polen de las especies *Cerealia*: *Centaurea cyanus*, *Plantago lanceolata* y *Polygonum ariculare*, en los espectros de esporas y polen que probablemente indican los albores de la agricultura en la región.
- El poema de Gilgamesh, un documento auténtico excepcional, que proporciona información sobre los viajes del mítico Gilgamesh, rey de Uruk y su viaje a través del “mar de la muerte”, que podría identificarse con el Mar Negro. Hay muchas características comunes entre la civilización del Mar Negro y su sucesora, la civilización sumeria, por lo que es tentador para DIMITROV (2010), asomar la posibilidad de que el héroe Gilgamesh sea un descendiente de Noé.

Estudios y revisiones más recientes efectuadas por YANCHILINA et al. (2017) muestran que la evidencia en forma de isótopos estables, edades de radiocarbono, mediciones de 87Sr/86Sr, sísmica de reflexión y núcleos tomados en la plataforma de los márgenes de Ucrania, Rumania, Bulgaria y Turquía, respaldan su hipótesis que indica una repentina inmersión de la plataforma del Mar Negro y el comienzo de la salinización de sus aguas a partir del 7.300 a.C., como consecuencia de la afluencia de aguas marinas del Mediterráneo.

La falta de observación de la superposición costera en cualquiera de los perfiles sísmicos sugiere además que

la transgresión tuvo que haber sido abrupta y no gradual. Si la transgresión hubiese sido lenta, se formaría una superficie de erosión o de ravinamiento, debido a la abrasión del sustrato por la acción de las olas, a medida que la costa retrocedía hacia el continente. En cambio, una cubierta de sedimentos del Holoceno cubre la superficie de manera uniforme y sin ningún indicio de retrabajo del material infrayacente. Una capa de coquina que cubre dunas costeras, a lo largo de toda el área, no contiene cantidades significativas de material, erosionadas del sustrato subyacente (YANCHILINA et al. 2017).

La ausencia de detritos provenientes de estratos infrayacentes a la superficie de erosión o límite de secuencia asociado a la exposición del área en la coquina inicial, sustenta que la transgresión fue un evento de inundación rápida, casi instantánea. Una estimación hecha por YANCHILINA et al. (2017), de los posibles caudales en el momento de la ruptura, indica que la duración de la inundación posiblemente no fue mayor de 40 años, e incluso de tan solo una década según algunos cálculos hidráulicos, valores similares a los obtenidos por RYAN et al. (2014). La salinización sustancial durante los primeros 900 años (desde el 7.300 al 6.400 a.C.) fue suficiente para excluir todos los moluscos de agua dulce y salobre heredados del lago anterior (YANCHILINA et al. 2017).

DOGGERLAND

Cambiando de lugar geográfico, al final de la última era glacial, Bretaña formaba parte de la esquina noroeste de un continente europeo parcialmente cubierto de hielos (Figura 7). Una vasta plataforma continental expuesta, denominada Doggerland, la cual poseía un clima más cálido, permitió un rápido poblamiento por seres humanos. Luego, poco a poco, con el aumento del calentamiento global y la subida gradual de los mares, las tierras más bajas comenzaron a inundarse progresivamente.

Una teoría postula que repentinamente alrededor del 6.200-6.700 a.C., una catastrófica inundación producto del derrame de dos enormes lagos glaciares en el Océano Atlántico del norte; los lagos Agassiz y Ojibway (Figura 8), los cuales aumentaron el nivel de los mares (TURNER y BROWN 2007), afectando el clima CLARKE et al. (2009), e inundando parcialmente las tierras de Doggerland, posiblemente contribuyendo también a la inundación del Mar Negro referida en el capítulo anterior.



Figura 7. Ubicación de la región conocida como Doggerland. Modificado de National Geographic (2023)

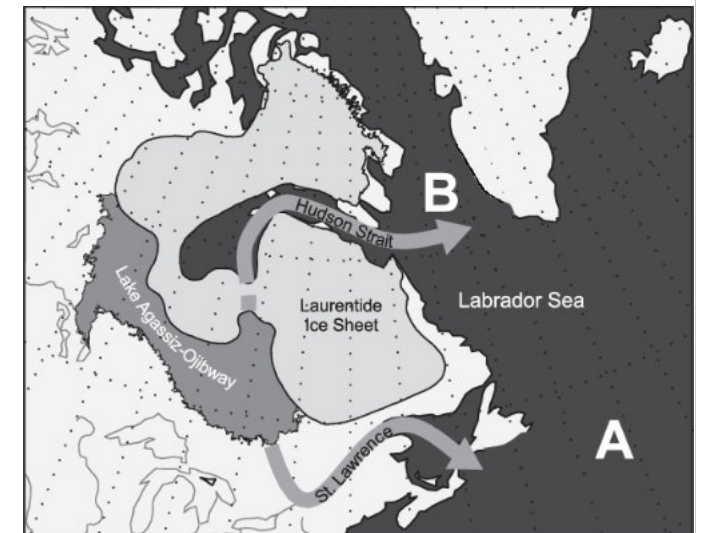


Figura 8. Ubicación del lago glacial Agassiz al tiempo de la inundación. El río St. Lawrence y el Estrecho de Hudson sirvieron como rutas para el desborde del agua del lago hacia el Atlántico Norte. Modificado de CLARKE et al. (2009).

Si bien el aumento del nivel del mar ocasionado por el posible derrame de Agassiz y Ojibway pudo jugar un papel importante en la inmersión de Doggerland, una hipótesis más reciente, sugiere que un evento catastrófico adicional conocido como Storegga Slide (KARSTENS et al. 2023, PICKERING et al. 2024), alteró aún más el destino de Doggerland, pero ahora alrededor del 6.150-6.400 a.C., donde un enorme deslizamiento de capas, en la plataforma submarina frente a la costa de Noruega, provocó un tsunami que inundó las llanuras bajas que aún sobrevivían, ocasionando que las zonas emergidas de esa región

entre Bretaña y Europa, fuesen inundadas por las aguas, acelerando la desaparición de Doggerland.

Evidencia de la presencia de tribus nómadas habitando en Doggerland ha sido encontrada con frecuencia, enterrada en el fondo marino, donde aún hoy en día, pescadores arrastrando sus redes han encontrado herramientas, cerámicas y huesos; hasta un cráneo de mastodonte completo con colmillos incluidos, todos ellos datados como anteriores al 7.000 a.C. El evento Storegga Slide habría tenido un impacto catastrófico instantáneo en la población de la región. Se estima que hasta una cuarta parte de la población mesolítica de Gran Bretaña perdió la vida debido al tsunami (KEYS 2020).

Doggerland no sólo fue un puente entre Europa continental y Bretaña por varios miles de años (Figura 7), sino también un rico hábitat para humanos y otros animales. Sus zonas bajas, sus abundantes pantanos y sus cuerpos de agua atrajeron a una variedad de animales, lo que lo convirtió en un paraíso para los humanos. El área fue tan rica en recursos que sustentó a una población significativa de pueblos mesolíticos de cazadores-recolectores (GAFFNEY et al. 2009).

LA ATLÁNTIDA ... ¿UN MITO?

Transportándonos ahora al Mediterráneo oriental, Platón, antiguo filósofo griego (Figura 9), que vivió entre el 427-347 a.C. escribió acerca de una gran civilización a la que llamó Atlantis nêsos, o la "isla de Atlas". En los diálogos de Platón, la Atlantis o Atlántida, fue fundada por una raza de gente mitad dioses mitad humanos y se presenta como un estado sofisticado que cayó después de que sus arrogantes líderes intentaron invadir Grecia. En represalia por el ansia de poder de su pueblo, dijo Platón, la Atlántida fue castigada por los dioses, quienes desataron desastres naturales que provocaron que se hundiera en el mar, aniquilando lo que quedaba de su poder. Los Atlantes vivían en una serie de islas, algunas de ellas con formas de círculos concéntricos, que fueron destruidas por un gran cataclismo (SMITH 2016).

Atlántida – la historia de una tierra próspera que desapareció sin dejar rastros, hundida en el mar, ha sido uno de los mitos más viejos y populares de la humanidad. Atlántida fue documentada por Platón en dos de sus diálogos, Kritias y Timeo, escritos en el 355 a.C. (SMITH 2016). Generalmente se acepta que el propósito de Platón para el uso de este mito era

completamente didáctico. Consideraba que solamente una minoría era capaz, o estaba interesada en seguir un razonamiento filosófico, y en cambio la mayoría se interesa por las historias y narraciones. Así pues, en teoría, Platón utilizaba los mitos para conducir a conclusiones con razonamientos filosóficos. Algunos de los mitos usados por Platón eran tradicionales, otros se basaban en mitos modificados. La versión de Platón pudiera no ser un reporte objetivo de eventos, sino un cuento de moralidad que usa la historia de eventos verdaderos o inventados, por tanto, es imposible distinguir los hechos de la ficción, sobre todo si fue originalmente transmitida de boca en boca y de generación en generación (SMITH 2016). Una de las cuestiones más debatidas a lo largo de muchas décadas, acerca de Atlántida, es su posible localización geográfica. Atlántida ha sido interpretada en casi todo lugar posible de la Tierra, lo cual prueba que no existen límites para la fantasía humana.

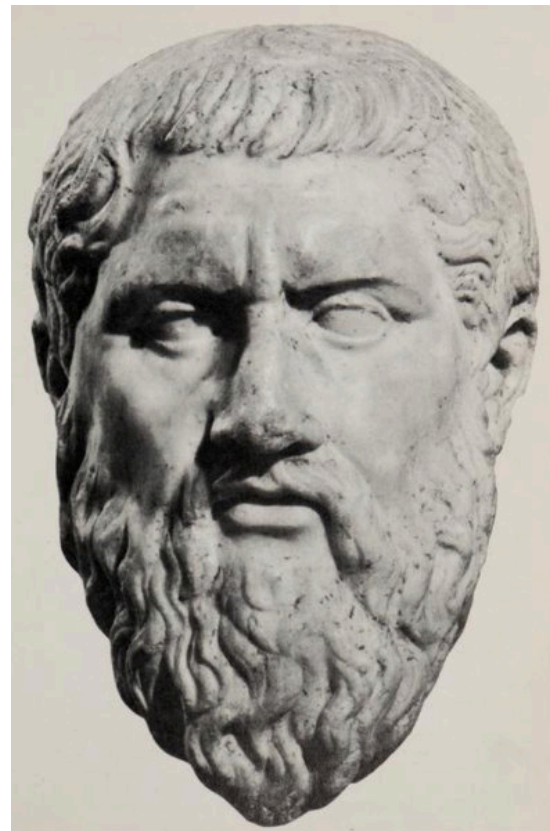


Figura 9. Platón. Estatua romana en mármol, copia de un original griego. Museo Fitzwilliam, Cambridge

No sabemos si Atlántida fue un lugar real pero su existencia pudo haber sido inspirada en alguna civilización que ocupara algunas islas del Mediterráneo. Entre las posibilidades, se encuentra Santorini en Grecia (Figura 10). Santorini es hoy en día un pequeño

archipiélago, pero hace miles de años pudo haber sido una sola gran isla volcánica denominada Thera. Hace cerca de 3.600 años (1.530-1.600 a.C.), el volcán explotó en una de las más grandes erupciones de la historia de la humanidad (KUSTCHERA 2020), destruyendo gran parte de isla, generando tsunamis y lanzando a la atmósfera toneladas de dióxido de sulfuro, que a su vez quedó suspendido por años, probablemente causando inviernos muy fríos y veranos muy lluviosos. Estas condiciones climáticas adversas pudieron haber arruinado las cosechas de la región (FIEDRICH 2000) y haber contribuido al declive de la civilización Minoica, existente en esa época, la cual había dominado el Mediterráneo desde la isla de Creta.



Figura 10. Vista cenital de Santorini. La isla es en realidad la punta de una caldera volcánica.

<https://www.planet.com/gallery/santorini-20160831/>

Algunos autores también asocian a la isla de Creta con la Atlántida (AUSTIN 2018), en lugar de con Santorini. Esto, sin embargo, no es contrario a la teoría, ya que Santorini y Creta compartían una cultura muy notable y avanzada, que desapareció de la isla de Creta unos 100 años después de la erupción. Probablemente, los impactos de dicha erupción fueron enormes para toda la región y podrían haber debilitado el poder de los minoicos en Creta, de modo que no pudieron sobrevivir

como sociedad avanzada y dominante, más allá de ese lapso.

¿HABRÁ SIDO SANTORINI PARTE DE LA ATLÁNTIDA?

GALANOPOULOS y BACON (1969) argumentan en su trabajo que la fecha de la destrucción de Atlántida dada por Platón de 9.000 años antes de su tiempo, es incorrecta y debería ser 900 años. Hay que recordar que Platón, quien vivió en el año 427-347 a.C., a su vez cita como fuente de información de la Atlántida, a su ancestro el poeta ateniense Solón quien vivió unos 200 años antes que él. Fue Solón quien adquirió la tradición oral de la Atlántida en Egipto y la llevo consigo a Atenas, adaptándola como un poema épico (SMITH 2016). Solón, obtuvo su información de un Sacerdote en Egipto, quien le aseguro que la civilización de la Atlántida había desaparecido 9.000 o 900 años antes, si asumimos el error de un cero adicional argumentado por GALANOPOULOS y BACON (1969). Sumando todo lo anterior da alrededor de 1.500 a.C., lo cual coincide bastante cerca de las dataciones más recientes de la erupción minoica para el 1.530-1.600 a.C. (KUSTCHERA 2020).

Las excavaciones y los hallazgos arqueológicos en Thera (nombre antiguo de Santorini) claramente demuestran que antes de la erupción minoica, existía en el lugar una comunidad marina altamente desarrollada y rica, de floreciente economía, provista de un comercio intensivo, con intercambio de productos y vino. No se sabe que le paso a esta población, ya que hasta ahora en las excavaciones no se ha encontrado ningún cuerpo humano, muerto por la erupción. Esto parece indicar que las advertencias del volcán dieron suficiente tiempo para evacuar la isla.

Un evento de este tamaño debe haber dejado una enorme impresión en la gente que vivió en esa época. Es difícil imaginar una erupción, mucho más grande que la del Vesubio (79 d.C.) y que haya sido completamente olvidada por la historia. HEIKEN y McCOY (1990) indican que la famosa pintura mural en la casa oeste descubierta durante las excavaciones de la antigua villa de Akrotiri en Santorini, probablemente representan un retrato de la antigua Thera. La pintura mural muestra, como vemos en la figura 11, una isla habitada, con un paisaje donde se observan animales, vegetación y muchas construcciones. Muestra además a la flota de Thera zarpando de la isla, y lo más llamativo son las estructuras concéntricas en anillos agua-tierra-agua-tierra, tal como la Atlántida que describe Platón.



Figura 11. Pintura al fresco (1.600 a.C.), encontrada en una casa del pueblo minoico de Akrotiri, Santorini. El fresco de 390 cm por 44 cm de alto, representa en su lado izquierdo a la isla concéntrica, con ciudades, así como a la flota de Thera zarparando de la bahía. Modificado de Strasser (2010).

EL CONTEXTO GEOLÓGICO DE SANTORINI

La zona volcánica de Santorini es la región más dinámica del arco volcánico del Mar Egeo. Dicho arco volcánico mide unos 500 km de largo y se extiende desde Grecia hasta Turquía. El movimiento nororiental de la placa africana hacia Grecia creó un margen oceánico continental convergente con su correspondiente complejo de arco volcánico y fosas marinas profundas (GOROKHOVICH 2012). La actividad sísmica del arco volcánico de Santorini, se extiende desde los 100-170 km de profundidad, y es ocasionada por la subducción de la placa africana bajo la placa Euroasiática, como se muestra en la figura 12. Este margen donde se ubica Santorini se conoce como Arco Volcánico del Sur del Egeo. La Santorini moderna se compone principalmente de rocas volcánicas como dacitas, andesitas, ignimbritas, basaltos, tefra y tobas.

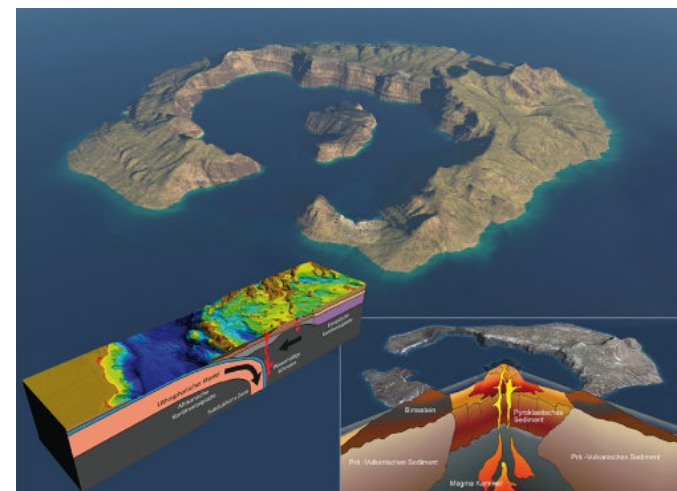


Figura 12. Contexto geodinámico del volcán de Santorini. <https://riosdelplaneta.com/wp-content/uploads/2020/04/Volcanes-submarinos-12.jpg>

LA ERUPCIÓN EN SANTORINI

Probablemente ningún testigo de la erupción de Santorini sobrevivió como para haber contado los detalles. Pero si es seguro, que lo que esta población experimentó, debe haber sido algo aterrador. Si comparamos esta erupción minoica con otras mucho más pequeñas como la del Vesubio (79 a.C.) y la del Krakatoa en 1883, entonces tendremos una idea de las circunstancias de la erupción. La nube de 30-40 km de altura producto de la explosión, debe haber sido vista a cientos de kilómetros y el ruido atronador de las explosiones debe haber sido escuchado en todo el mundo mediterráneo. Ceniza volcánica y pumita deben haber caído por todo el este del Mar Mediterráneo (Figura 13), y haber durado días o semanas (FIEDRICH 2000). El cielo debe haberse oscurecido por completo, por horas e incluso días. Probablemente se generaron tsunamis (como en la erupción del Krakatoa) y seguramente los mismos devastaron las costas de Creta e islas alrededor. A escala global, el clima debe haber cambiado durante algunos años causando un enfriamiento, y afectando los cultivos de una extensa región.



Figura 13. Mapa mostrando la extensión y dirección de los depósitos de caída de ceniza volcánica asociada a la erupción minoica de Santorini. Modificado de Fiedrich (2000).

LA ATLÁNTIDA – NUEVAS TEORÍAS

Es indudable que Santorini y su erupción volcánica, así como la avanzada civilización Minoica que la habitaba, es lo que hasta ahora mejor ajusta a la descripción de la Atlántida. Esto por supuesto nunca ha sido una hipótesis sin problemas. Siempre ha sido un escollo el que la cronología que nos plantea Platón de 9.000 años a.C. (GALANOPOULOS y BACON 1969), haya tenido que ser descartada ya que no existe, ni en la historia de Atenas, ni los detalles corresponden con ese periodo de tiempo. Mientras que Santorini encaja perfectamente como el sitio donde la corona de Atlantis alguna vez residió (con sus anillos concéntricos de mar y tierra), el

problema principal es que Santorini por si sola, no coincide con la descripción completa de Platón.

La isla principal de Atlántida, según describe Platón, se encontraba a nueve km de distancia de la isla concéntrica. Esta discrepancia es la que ha hecho que algunos científicos duden de la hipótesis de Santorini, y por lo tanto cuestionen incluso la veracidad de la historia descrita por Platón. Sin embargo, cada investigación llega en algún momento a su clímax. Un estudio de cuatro años de duración efectuado por DJONIS (2013), que incluyó un examen exhaustivo del trabajo de Platón, estableció que existen serios errores en las traducciones que se hicieron de sus escritos, generando algunas confusiones. Este estudio concluye que Atlántida según la descripción de Platón, si está en el Mar Mediterráneo y concluye además que se identificaron una serie de islas hoy sumergidas que coinciden plenamente con la descripción de Atlántida. La topografía, la cronología, la geología volcánica, la flora y fauna del periodo y la destrucción de Atlántida por una gran inundación, todo coincide plenamente con lo narrado por Platón.

Específicamente, el estudio de DJONIS (2013) concluye que alrededor del 9.000 a.C., cuando de acuerdo a Platón, Atlántida era una gran isla, las actuales Islas Cícladas estaban unidas a través de una meseta bastante plana que hoy día se encuentra a 125 m bajo el nivel del mar, conectando todas las actuales islas en una gran masa de tierra. Cuando se compara el cuerpo de esta gran isla con la Atlántida de Platón, inmediatamente, según el referido autor, se asoma la posibilidad de que esta debe haber sido la tierra que describe Platón en su libro.

En la descripción de Platón, su región norte estaría compuesta por montañas que terminan en la costa. Al sur de estas montañas existiría un valle oblongo de unos 550 km² y más aún al sur, otro valle más pequeño de 370 km². Esta sería la isla principal de Atlántida, y 9 km al sur de ella, precisamente como lo describe Platón, está la isla de Santorini, una isla circular, con un centro inundado, producto del colapso del volcán. La isla previamente a la erupción ocurrida dentro del lapso del 1.530-1.600 a.C., tenía una sola apertura en su anillo externo (NOMIKOU et al. 2016), que permitía a los barcos entrar a su interior. En los mapas de las figuras 14 y 15, publicados por DJONIS (2013), se observa el plateau de las Cícladas que con un nivel de mar más bajo conectaría a todas las actuales islas; y a unos pocos

kilómetros de distancia hacia el sur, estaría Santorini (Figura 14), muy similar en su forma externa, a la de hoy día (NOMIKOU et al. 2016), tal vez con un 20% mayor en área emergida, precisamente por el nivel más bajo del Mar Mediterráneo para la época, todo ello bastante similar a la descripción de Platón según refiere DJONIS (2013).

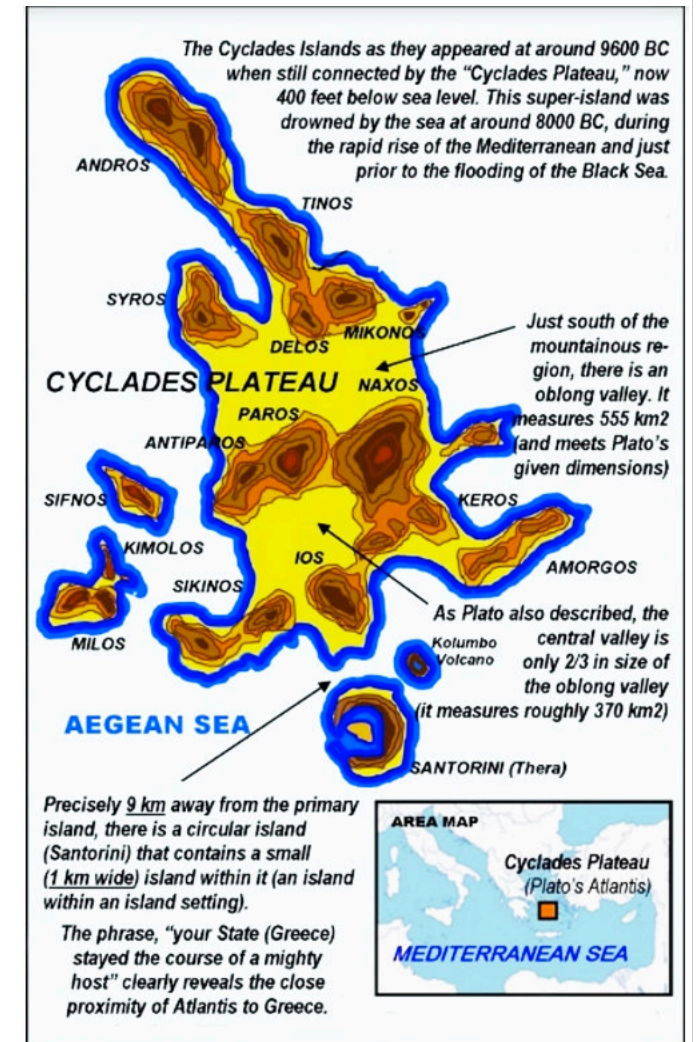


Figura 14. Plateau de las Islas Cícladas, tal y como se encontrarían emergidas hace unos 9.600 años. Modificado de Djonis (2013).

La consecuencia de fijar la existencia de la Atlántida alrededor del 9.000 a.C., pareciera sugerir que Platón sí basó su historia en hechos reales de una antigua civilización conocida por los griegos, a los cuales la misma transmitió muchas de las ideas filosóficas (divino vs. humano, sociedad ideal vs. corrupta) que posteriormente exhibieron los griegos. Platón probablemente adornó la historia con hechos más familiares para él, incluyendo detalles de la era Minoica que eran más cercanos a su tiempo. En esencia Platón

hizo lo mismo que hizo Homero con Troya 400 años antes que él. La *Ilíada* de Homero fue una historia de ficción ambientada en un sitio real y con un incidente histórico que sucedió 600 años antes del propio Homero.

La súper isla de la meseta de las Cícladas (Atlántida) muy probablemente fue progresivamente inundada por el mar a partir del 9.000 hasta por lo menos el 7.300 a.C., durante el aumento del nivel general de los océanos y del Mediterráneo, poco antes de la inundación del Mar Negro, evento que se comentó en capítulos anteriores.

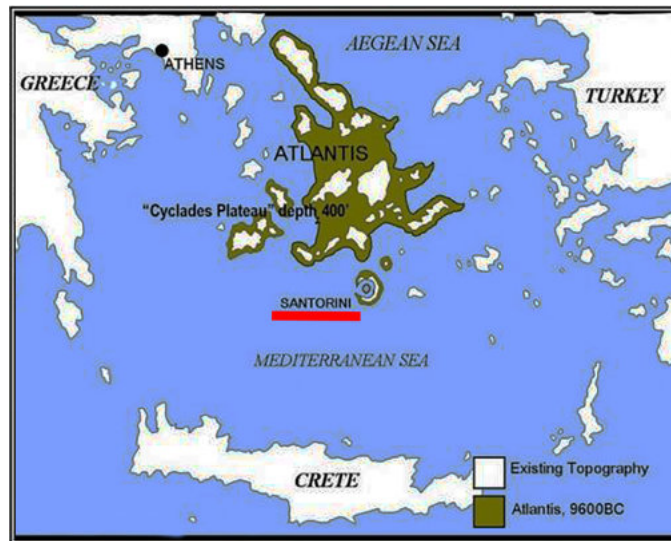


Figura 15. Plateau de las Islas Cícladas hace 9.600 años y su relación areal, con respecto al contexto del Mar Mediterráneo. Modificado de Djonis (2013).

REFLEXIONES FINALES

¿Se ubico la Atlántida en Santorini? Quizás esta sea una pregunta o un concepto equivocado. Probablemente en ningún momento existió un lugar cuyo nombre escrito sobre un mapa fuese Atlantis o La Atlántida. La teoría de que el evento volcánico ocurrido alrededor del 1.530-1.600 a.C., en el archipiélago de Santorini (Figura 15), pareciera ser la fuente detrás de la historia de

Platón sobre la Atlántida, es la teoría que hasta ahora luce mejor respaldada que cualquier otra, aunque muchos detalles seguirán sin estar claros y sujetos a especulación. La aparición de una nueva teoría con una súper isla constituida por la meseta de las Cícladas, y que posiblemente fue inundada por el aumento del nivel del Mar Mediterráneo, luce muy atractiva, ya que podría estar directamente relacionada con la posterior inundación del Mar Negro y a su vez con la progresiva desaparición bajo las aguas de una gran parte de la región de Doggerland, en el noroeste europeo.

Cualquier conclusión más allá de este punto, estaría entrando en la ficción, más del lado del mito que del lado de la explicación geológica, por lo menos hasta que las edades de estos posibles eventos geocatastróficos, sean aclaradas sin lugar a dudas, o incluso hasta que nuevas expediciones submarinas en el futuro, continúen explorando las antiguas líneas de costa en el fondo del Mar Negro; o que una expedición se atreva a descender hasta la sumergida meseta de las Cícladas, y pueda comprobar la existencia o no, de restos de ciudades o de asentamientos humanos, y datarlos alrededor de las fechas citadas. Por los momentos, estas teorías, siguen y seguirán alimentando la imaginación y las ansias de investigación de los geocientíficos.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento a la Dra. Adrienne Mayor, investigadora en el Departamento de Clásicos, y del Programa de la Historia y la Filosofía de las Ciencias en la Universidad de Stanford, por haber sembrado con sus artículos y libros, en mi persona, el interés en la Geomitología. Asimismo, por haber compartido desinteresadamente durante un largo tiempo, mucho del material utilizado para desarrollar mi curso universitario de Geomitología.



Figura 15. Vistas modernas de Santorini. **A.** Vista de la caldera con la mayor isla central a la derecha (Nea Kameni). **B.** El autor con su hija Alexia y la ciudad de Fira al fondo. **C.** Capas de escorias volcánicas y lavas, con las típicas casas blancas de la población de Fira en el tope. **D.** Cruceros turísticos en el lado interno sur de la caldera y al fondo capas de colores claros de pumita, intercaladas con lavas y escorias volcánicas. Fuente: Fotografías del autor.

REFERENCIAS

- AUSTIN, N. 2018. *Atlantis: The Minoan truth*. Ogmium Press, 210 p.
- BALLARD, W. HIEBERT, F., COLEMA, D., WARD, C., SMITH, J., WILLIS, K., FOLEY, B., CROFF, K., MAJOR, C. & TORRE, F. 2001. Deepwater Archaeology of the Black Sea: The 2000 Season at Sinop, Turkey, *American Journal of Archaeology* 105: 607-623.
- CASAS, J. 2024. Geomitología ¿Una conexión entre el Diluvio Universal, la desaparición de Doggerland y la Atlántida?. *Boletín de la Academia Nacional de Ingeniería y el Hábitat*, Caracas, Venezuela. 65, 121-139.
- CLARKE, G., BUSH, A. and BUSH, J. 2009. Freshwater discharge, sediment transport, and modeled climate impacts of the final drainage of Glacial Lake Agassiz. *Journal of Climate*. 22: 2161-2180.
- DIMITROV, P. 2003. The Black Sea – A clue to the secret of World Flood. *Oceanology*. 4: 52-56. https://www.researchgate.net/publication/284602641_The_Black_Sea_-_a_Clue_to_the_Secret_of_World_Flood
- DIMITROV, D. 2010. *Geology and Non-traditional resources of the Black Sea*. Lap Lambert Academic Publishing, Deutschland, 240 p.
- DIMITROV, P. & DIMITROV, D. 2004. *The Black Sea, the flood and the ancient myths*. Slavona Press., ISBN 954-579-335-X. 121 p.
- DIMITROV, D., DIMITROV, P., SOLAKOV, D. & PEYCHEV, V. 2005. The newest geological history of the Black Sea and problem about the flood. *1st plenary meeting of project IGCP-521*. 37-38.
- DIMITROV, P., RYAN, W., BALLARD, R., HAARMANN, H., DIMITROV, D., SOLAKOV, D., SLAVOVA, K., PEEV, P., PEYCHEV, V., PETROV, P., LERICOLAIS G. 2006. The Flood in the Black Sea - Science and Mythology. *2nd plenary meeting of Project IGCP-521*, Odessa, Ukraine, 20-28. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/4934/>
- DJONIS, C. 2021. *Atlantis: The Find of a Lifetime*. Page Publishing, USA. 160 p.
- FRIEDRICH, W.L., 2000. *Fire in the Sea*. *Fire in the Sea*, by Walter L. Friedrich and Translated by Alexander R. McBirney. ISBN 0521652901. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 272 p.
- GAFFNEY, V., FITCH, S. & SMITH, D. 2009. Europe's Lost World. The Rediscovery of Doggerland. *Council British Archeology, Research Report* 160, 224 p. https://www.researchgate.net/publication/259639459_Europe%27s_Lost_World_The_Rediscovery_of_Doggerland
- GIOSAN, L., FILIP, F. & CONSTANTINESCU, S. 2008. Was the Black Sea catastrophically flooded in

- the Early Holocene?. *Quaternary Science Reviews*. 28(1): 1-6.
https://www.researchgate.net/publication/255581233_Was_the_Black_Sea_catastrophically_flooded_in_the_early_Holocene
- GOROKHOVICH, Y. 2012. Santorini eruption. En Peter Bobrowsky (ed.) *Encyclopedia of Natural Hazards*. Springer-Verlag, Berlin, 511 p. <http://www.springerreference.com/index/chapterdbid/349104>
- KARSTENS, J., HAFLIDASON, H., BERNDT, C. 2023. Revised Storegga Slide reconstruction reveals two major submarine landslides 12,000 years apart. *Commun Earth Environ* 4(55): 1-9. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00710-y>
- KEYS, D. 2020. *How a giant tsunami devastated Britain's Atlantis*. The Independent. Recuperado el 25 de junio de 2024. <https://www.independent.co.uk/news/science/archaeology/tsunami-britain-atlantis-6200-bc-archaeology-a9622591.html>
- KUTSCHERA, W. On the enigma of dating the Minoan eruption of Santorini. *Anthropology*. 117 (16) 8677-8679. <<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2004243117>>
- LARA, F. *Leyendas de la antigua Mesopotamia. Dioses, Héroes y seres fantásticos*. Ediciones Temas de Hoy, España. 366 p. https://archive.org/stream/lara-peinado-federico-leyendas-de-la-antigua-mesopotamia.-dioses-heroes-y-seres-fantasticos/Lara%20Peinado%2C%20Federico%20-%20Leyendas%20de%20la%20antigua%20Mesopotamia.%20Dioses%2C%20h%C3%A9roes%20y%20seres%20fant%C3%A1sticos_djvu.txt
- MAYOR, A. 2004. Geomythology. En R. Selley, R. Cocks, and I. Palmer (eds.) *Encyclopedia of Geology*, Elsevier, 594 p. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-encyclopediaofgeology-voli-e.pdf>
- McDONALD, L. A. 2018. *Worldwide Waters: Laurasian Flood Myths and their Connections*. Georgia Southern University. Unpublished Honors College Theses. 381 pp. <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/honors-theses/381>
- NATIONAL GEOGRAPHIC 2023. <https://education.nationalgeographic.org/resource/doggerland/>
- NOMIKOU, P. DRUITT, T., HUBSCHER, C., MATHER, T., PAULATTO, M., KALNINS, L., KELFOUN, K., PAPANIKOLAOU, D., BEJELOU, K., LAMPRIDOU, D. 2016. Post-eruptive flooding of Santorini caldera and implications for tsunami generation. *Nature Communications*. 1-10. <file:///Users/jhonny/Downloads/ncomms13332.pdf>
- PICKERING, L., SUMMERS, G., HOCKING, E., GARRETT, E. & SIMMS, A. 2024. Microfossil an geochemical evidence for the Storegga tsunami at Budle Bay, Northumberland, UK. *Sedimentologica*, 2: 1-15
<https://doi.org/10.57035/journals/sdk.2024.e22.1280>
- REYNA-VALERA, R. 1960. Génesis, Sociedades Bíblicas Unidas. Recuperado el 14 de octubre de 2024 de: <https://www.biblegateway.com/passage/?search=G%C3%A9nesis%206-7&version=RVR1960>
- RYAN, W., PITMAN, W., MAJOR, C.O., SHIMKUS, K., MOSKALENKO, V., JONES, G., DIMITROV, P., GORUR, N., SAKINC, M. & YUCE, H. 1997. An abrupt drowning of the Black Sea shelf. *Marine Geology*, 138 119-126
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00007-8)
- RYAN, W., MAJOR, C., LERICOLAIS, G. & GOLDSTEIN, S. 2003. Catastrophic Flooding of the Black Sea. *Annual Review of Earth and Planetary Science*. 31: 525-554 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003AREPS..31..525R/abstract>
- RYAN, W., VACHTMAN, D., MCHUGH, C., CAGATAY, N. & MART, Y. 2014. A Channeled Shelf Fan Initiated by Flooding of the Black Sea. En S. Goffredo and Z. Dubinsky (eds.), *The Mediterranean Sea: Its history and present challenges*. Springer. 11-27. DOI 10.1007/978-94-007-6704-1_2
- SHOPOV, Y., YALAMOV, T., DIMITROV, P., DIMITROV, D. & SHKODROV, B. 2009. Initiation of the migration of vedic arya to India by a catastrophic flooding of the fresh water Black Sea by Mediterranean Sea during the Holocene. *LIMPACS-3 International Conference of IGBP*. 126-127.
- SIDDALL, M., PRATT, L.J., HELFRICH, K.R., GIOSAN, L. (2004) Testing the physical oceanographic implications of the suggested sudden Black Sea infill 8400 years ago. *Paleoceanography* 19: 10-24. DOI:10.1029/2003PA000903
- SILVA, J. 2000. *Gilgamesh o la angustia por la muerte: poema babilonio*. Traducción directa del Acadio. Colegio de México, Centro de estudios de Asia y África. 4ta edición, 230 p.
- SMITH, O. 2016. The Atlantis Story: An authentic oral tradition?. *Shima Journal*. 10(2); 11-17
- STRASSER, T.F. 2010. Location and perspective in the Theran Flotilla Fresco. *Journal of Mediterranean Archeology*. 23(1): 3-26.
- TURNER, C. AND BROWN, H. 2007. Catastrophic Early Holocene Sea Level Rise, Human Migration and the Neolithic Transition in Europe, *Quaternary Science Reviews*, 26, 2036-2041.

- VENTURA, D. 2020. La fascinante historia de la "Epopéya de Gilgamesh", la obra que contó el Diluvio Universal antes que la Biblia. Recuperado el 14 de octubre de 2023 de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-52896104>
- VITALIANO, D. 1968. Geomithology: The Impact of Geologic Events on History and Legend with Special Reference to Atlantis. *Journal of the Folklore Institute*, (5)1: 5-30.
- WITZEL, E. J. M. 2012. *The Origins of the World's Mythologies*. Oxford University Press. p. 345.
- YANCHILINA, A., RYAN, W., MCMANUS, J., DIMITROV, P., DIMITROV, D., SLAVOVA, K. & FILIPOVA-MARINOVA, M. 2017. Compilation of geophysical, geochronological, and geochemical evidence indicates a rapid Mediterranean-derived submergence of the Black Sea's shelf and subsequent substantial salinification in the early Holocene. *Marine Geology*, 383: 14-34. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.11.001>
- YANKO-HOMBACH, V., GILBERT, A. & DOLUKHANOV, P. 2007. Controversy over the great flood hypotheses in the Black Sea in light of geological, paleontological, and archaeological evidence. *Quaternary International* 167-168: 91-113
https://www.researchgate.net/publication/223177419_Controversy_over_the_great_flood_hypotheses_in_the_Black_Sea_in_light_of_geological_paleontological_and_archaeological_evidence



jcasas@geologist.com

Jhonny E. Casas es Ingeniero Geólogo graduado de la Universidad Central de Venezuela, y con una maestría en Sedimentología, obtenida en McMaster University, Canadá. Tiene 38 años de experiencia en geología de producción y exploración, modelos estratigráficos y secuenciales, caracterización de yacimientos y estudios integrados para diferentes cuencas en Canadá, Venezuela, Colombia, Bolivia, Ecuador y Perú.

Autor/Co-autor en 59 publicaciones para diferentes boletines y revistas técnicas, como: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, Geophysics, The Leading Edge, Asociación Paleontológica Argentina, Paleontology, Journal of Petroleum Geology, Academia de Ciencias, Academia de Ingeniería y Caribbean Journal of Earth Sciences; incluyendo presentaciones en eventos técnicos: AAPG, SPE, CSPG-SEPM y Congresos Geológicos en Venezuela y Colombia, así como artículos históricos en el boletín AAPG Explorer.

Profesor de Geología del Petróleo (1996-2004). Profesor de materias de postgrado tales como: Estratigrafía Secuencial, Modelos de Facies y Análogos de afloramiento para la caracterización de yacimientos (2003-2025), en la Universidad Central de Venezuela. Mentor en 12 tesis de maestría. Representante regional para la International Association of Sedimentologist (2020-2026) y ExDirector de Educación en la American Association of Petroleum Geologists (AAPG) para la región de Latinoamérica y del Caribe (2021-2023). Advisory Counselor para AAPG LACR (2023-2026).

El valor didáctico del patrimonio geológico en la carrera de ingeniería geológica

MSc. **Yaritza Aldana Aldana**, Universidad de Moa, yaldana@ismm.edu.cu, <http://orcid.org/0000-0002-9986-281X>

Dr.C. **Rafael Miguel Guardado Lacaba**, Universidad de Moa, rguardado@ismm.edu.cu, <http://orcid.org/0000-0003-1075-8176>,

Dr. C. **Felipe Enio Robas Díaz**, Universidad de Guantánamo, enio@cug.co.cu <http://orcid.org/0000-0003-1912-4823>

Resumen

En nuestro país, ha sido insuficiente el proceso relacionado a la didáctica del patrimonio geológico dirigido a una preservación y protección especial del ambiente y en particular del medio geológico. En Cuba son abundantes los sitios de interés geológico necesarios valorar y preservar como Patrimonio Geológico, elemento significativo del patrimonio natural. El artículo tiene como objetivo presentar una Plataforma Didáctica que permita generar un valor didáctico al proceso formativo de los profesionales de la Ingeniería Geológica. Integrar el valor didáctico del patrimonio geológico al proceso formativo de los profesionales y estudiantes de la Geología en Cuba para favorecer y ampliar el conocimiento geológico, al identificar de sitios de interés geológico y geoparques. Finalmente se obtuvieron aproximaciones de la didáctica del patrimonio geológico y se elaboró una Plataforma Didáctica para su contextualización en la práctica educativa de la carrera.

Palabras clave: Patrimonio geológico; Didáctica del patrimonio geológico; Proceso formativo; Formación patrimonial; Plataforma Didáctica

Abstract

Teaching about the geological heritage of our country that is directed toward the preservation and protection of the environment has been insufficient, particularly concerning geological aspects. There are many sites of geological interest in Cuba that are necessary to value and preserve as part of our geological heritage; a significant element of our natural heritage. This article presents a Didactic Platform that will generate value in the educational of Geological Engineering professionals through the integration of geological heritage into the training of geology professionals and students in Cuba. This promotes and expands their geological knowledge by identifying sites of geological interest and geoparks. Finally, teaching of our geological heritage was developed as part of a Didactic Platform for contextualization within the career oriented educational process.

Keywords: Geological heritage; Didactics of geological heritage; Formative process; Patrimonial formation; Didactic Platform

INTRODUCCIÓN

De las investigaciones en Ciencias Pedagógicas y Geológicas, en nuestro país ha sido escaso el tratamiento relacionado con la didáctica del patrimonio geológico; dirigido a una preservación y

protección especial del ambiente y en particular del medio geológico. El estudio del patrimonio geológico representa una de las más recientes áreas de investigación incorporadas al ámbito de la Didáctica, la Geología, y de la conservación de la naturaleza. Es el resultado de un nuevo modo de entender el papel del hombre en su relación con la Tierra. Con el paso del tiempo, esta nueva percepción ha ido calando en la sociedad, que ya considera un derecho, una necesidad y un deber: proteger el ambiente, promover un desarrollo sostenible y dejar para las generaciones futuras un entorno bien conservado, incluyendo los elementos geológicos de interés excepcional.

Cualquier elemento natural tiene su figura de protección. Igual que enseñamos que las flores no están para arrancarlas sino para disfrutar de su belleza y olor, de ellas en cada paseo y que puedan ser vistas por los que vendrán más tarde, debemos educar también a las personas en el respeto al Patrimonio Geológico. Para ello hay que formar tanto a profesores, alumnos como al resto de la sociedad, para querer algo antes hay que entenderlo y apreciarlo.

En la formación del profesorado como en la del alumnado de la carrera de Ingeniería Geológica, además del problema de los recursos y riesgos geológicos, existen diferencias históricas, educativas y culturales basadas en lo geológico patrimonial. Cuba tiene un diverso patrimonio geológico escasamente investigado, por lo que es necesario llevar a cabo estudios de detalle de nuevos geositiros, muestras geológicas y Parques Geológicos lugares de interés por los conocimientos y usos de la Geodiversidad. Dichos estudios permitirán la puesta en valor del patrimonio geológico y de los conocimientos y usos tradicionales de la Geodiversidad de la región. Cuba es rica en el patrimonio geológico de ahí el interés de su conocimiento y de crear en las nuevas generaciones de estudiantes universitarios un interés por alcanzar el conocimiento y protección de estos sitios de interés geológico. Figura 1.

La difusión del patrimonio geológico por medio de la formación profesional requiere de nuevos enfoques que garanticen incorporar la temática al proceso docente – educativo de la carrera. En tal sentido, los autores conciben una plataforma didáctica para el conocimiento del patrimonio geológico, a implementar mediante las disciplinas de la carrera: Geoquímica, Geodinámica, y Geología Aplicada.



Figura 1. Mogotes del Valle de Viñales en Pinar del Río. Propuesta de Geoparque Nacional de Cuba.

El presente artículo tiene como objetivo diseñar una plataforma didáctica que permite la incorporación del patrimonio geológico al proceso formativo de los profesionales de la Ingeniería Geológica, para garantizar el cumplimiento de su encargo social de proteger el patrimonio geológico nacional. Se resalta la necesidad de integrar la didáctica del patrimonio geológico al proceso formativo de los profesionales de la Geología en Cuba para favorecer la identificación y protección del patrimonio geológico, hasta lograr aplicar medidas de conservación en espacios naturales y geoparques que aporten al desarrollo económico y social en el país.

Los resultados obtenidos en este trabajo, así como la propuesta metodológica incluida permitirán a los egresados de la carrera de Ingeniería Geológica continuar realizando estudios similares en otras regiones de ámbito nacional o internacional. Finalmente, la explotación sostenible del patrimonio geológico por parte de las comunidades donde aparecen estos recursos naturales geológicos con valor patrimonial, puede representar un motor económico para la región.

EL VALOR DE INTEGRAR LA FORMACIÓN PATRIMONIAL EN LA CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA

El 16 de noviembre de 1972 se firmó en París, la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural, y se reconoció la necesidad de identificar y proteger el patrimonio cultural y natural, el cual es insustituible. Esta Convención en su apartado VI Programas educativos, incluye el artículo 27 que expone la necesidad de que los Estados estimulen el respeto y el aprecio por el

patrimonio cultural y natural, sobre todo mediante programas de educación e información para favorecer su cuidado y preservación. Se impone entonces reconsiderar lo realizado en torno a la educación patrimonial y proponer nuevos estudios y acciones encaminadas a la conservación y protección del patrimonio cultural y natural.

En ese orden, la Agenda 2030 y los Objetivos para el Desarrollo Sostenible, aprobada en septiembre de 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, en su objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles, propone la necesidad de redoblar los esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo.

El Ministerio de Educación Superior MES, actualmente acomete el perfeccionamiento de una nueva generación de planes de estudio. En la carrera Ingeniería Geológica se implementa el plan E, que tiene entre sus funciones promover, desarrollar y difundir la cultura, por lo que el patrimonio por su significado para la identidad nacional, se erige como un elemento esencial para la promoción y difusión de los elementos culturales del país.

Cuba, aprobó en el año 2020 nuevas normas jurídicas para la preservación del patrimonio y así garantizar su identificación, conservación y protección, a tal efecto se requiere de una actualización en la formación del personal docente y la introducción de la temática patrimonial en los planes de estudio de las diferentes especialidades.

El estudio del patrimonio ha ocupado a numerosos investigadores que reconocen su valor y la necesidad de su protección, se destacan investigadores de la Universidad de Moa y del Instituto de Geología y Paleontología, sin embargo, a pesar de que los esfuerzos han sido loables se requiere de nuevos enfoques teórico - prácticos que favorezcan identificar el patrimonio de las comunidades que lo atesoran para garantizar su divulgación y su protección.



Figura 2. Estudiantes y profesores de la carrera de Ingeniería Geológica estudian los sitios de interés geológico en la Región Oriental.

El plan de estudio de la carrera de Ingeniería Geológica, forma profesionales que se responsabilizan con la prospección y exploración del medio geológico en busca de recursos minerales sólidos, petróleo, gas y aguas subterráneas, la reducción de los riesgos de desastres geológicos y la búsqueda de áreas estables para la construcción de distintos tipos de obras ingenieras, Figura 2. Sin embargo, el plan de estudios requiere de una mayor orientación a la formación patrimonial de los estudiantes y profesores.

A tenor de lo anterior y desde la interpretación de los datos reales se manifiestan algunas insuficiencias en el proceso formativo de la carrera Ingeniería Geológica relacionadas con limitaciones en los estudiantes para reconocer el valor que el patrimonio geológico representa para el país, lo que deviene en el problema científico (Figura 3).

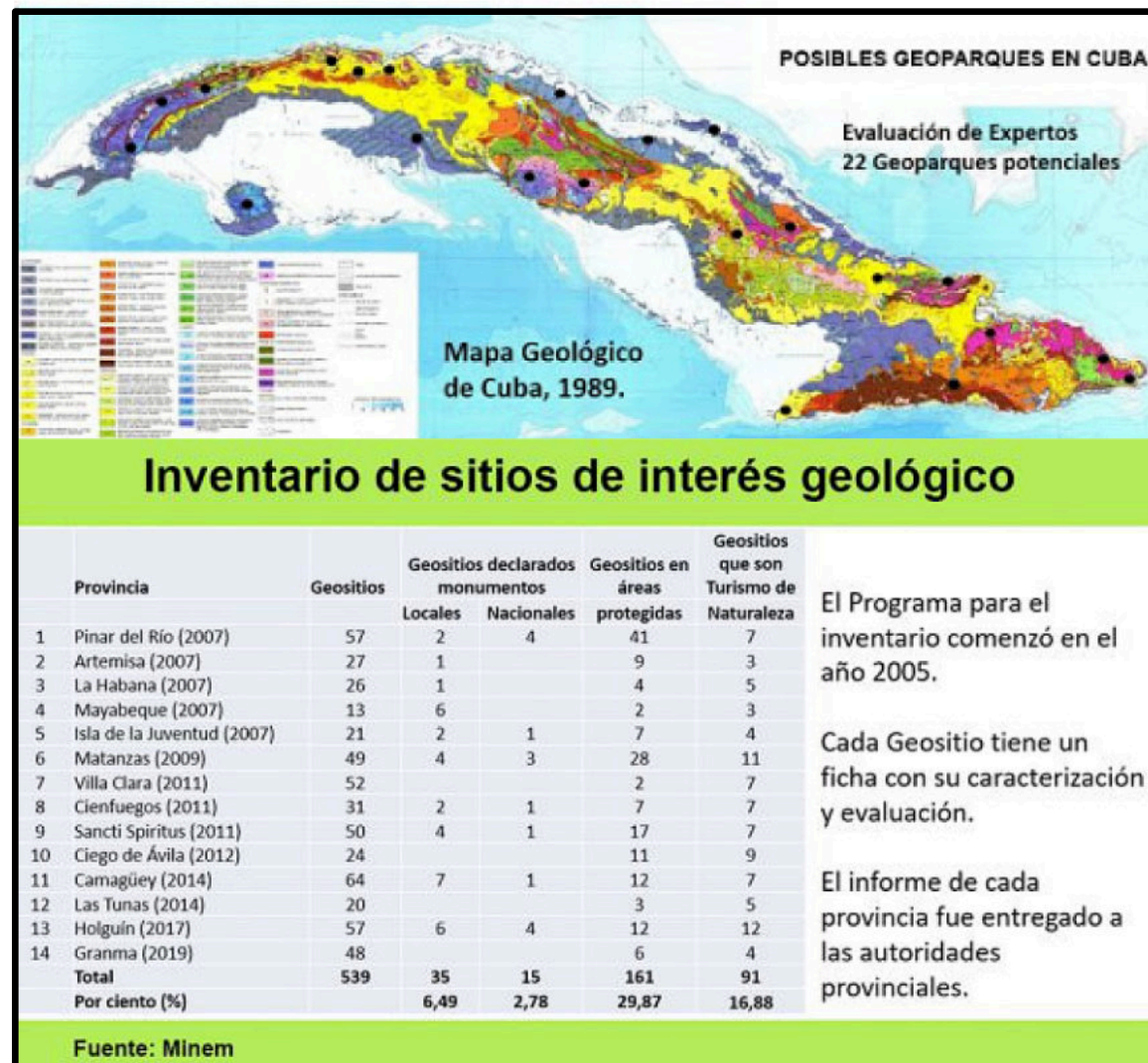


Figura 3. Inventario de los geositos en Cuba MINEM, 2005. El mapa fue confeccionado con la información de los miembros del Grupo de Expertos de Patrimonio Geológico, que lidera el MINEM. 3 b) Inventario de sitios de interés geológico, la tabla fue elaborada por investigadores del IGP, Cuba.

La necesidad de integrar la formación patrimonial al proceso formativo en la carrera Ingeniería Geológica amplía la cultura general integral de los estudiantes, a la vez que se elevan sus conocimientos acerca de la Geología y de sus relaciones entre la universidad y los valores culturales del contexto.

El estudio del patrimonio ha ocupado a numerosos investigadores que reconocen su valor y la necesidad didáctica, entre ellos se destacan Cuenca (2002), quien aborda esta temática desde la didáctica de las Ciencias Sociales; Cantón (2009), que propone la educación patrimonial como estrategia para la formación ciudadana; De los Santos (2013), que introduce el tratamiento a la educación patrimonial desde el patrimonio industrial minero en Corrales de Aljaraque. Por otra parte, (Díaz, et al., 2008, p.1314, Guardado, et al 2003), coincide en su valor didáctico para la formación integral de los profesionales de la Ciencias de la Tierra.

En Cuba un equipo del IGP ha diseñado una metodología para el estudio del patrimonio geológico (Gutiérrez, et. al., 2007), que permite catalogar los geositos y realizar los inventarios de los mismos desde Pinar del Río hasta Granma. Este equipo ha asesorado y apoyado a la Empresa de Geominera Oriente en la investigación del patrimonio geológico de Santiago de Cuba y a la Universidad de Moa en el estudio de esta temática en Guantánamo y Holguín. Se han publicado trabajos sobre patrimonio geológico por componentes de este equipo desde 2005, hasta 2020 dentro y fuera del país

En correspondencia con estos resultados y para garantizar la preparación de los profesionales de la Geología para valorar el patrimonio geológico y favorecer su protección y divulgación, se aplica en la carrera Ingeniería Geológica una **Plataforma Didáctica**, que permite completar la formación patrimonial en la carrera, mediante la integración de los contenidos, habilidades y valores relacionados con el patrimonio geológico a través del despliegue de métodos, herramientas y técnicas destinados a lograr su, identificación, divulgación y protección.

En ese orden, la didáctica del patrimonio geológico imprime rasgos distintivos al proceso docente-educativo de la carrera Ingeniería Geológica. Activa las relaciones que operan entre los recursos naturales geológicos que conforman el patrimonio geológico y el colectivo pedagógico responsable de emplearlos como recurso educativo para favorecer en los estudiantes su disfrute, identificación y protección.

Su aplicación en la práctica educativa se materializa a través de las acciones docentes metodológicas que desarrolle el colectivo de carrera, su experiencia para desarrollar la didáctica del

patrimonio geológico y su creatividad para incorporar al sistema de conocimientos de las disciplinas de la formación profesional de la carrera los conocimientos, las habilidades y los valores que garanticen el tratamiento didáctico del patrimonio geológico. Este proceso, al nivel de los colectivos de año, disciplinas y asignaturas permite generar un sistema de evaluaciones encaminadas a constatar el conocimiento del patrimonio geológico, así como sus habilidades y valores para identificarlo y protegerlo al amparo de las normas vigentes.

BASES CONCEPTUALES DE LA PLATAFORMA DIDÁCTICA DE FORMACIÓN PATRIMONIAL EN FUNCIÓN DEL CONOCIMIENTO DEL PATRIMONIO GEOLÓGICO, EN LA CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

En la fundamentación didáctica del diseño del plan de estudio se emplearon tres elementos claves, que están presentes en la Plataforma Didáctica de formación patrimonial, en función del conocimiento del patrimonio geológico en la carrera de Ingeniería Geológica:

- ✎ El proceso de formación continua.
- ✎ El continuo incremento de la calidad en el proceso de formación.
- ✎ El concepto de formación integral.

El proceso de formación continua

Las actuales y futuras necesidades educativas de la **Plataforma Didáctica de la Formación Patrimonial** están fundadas en la concepción de una formación continua, basada en la idea de que el hombre se educa durante toda la vida y del reconocimiento de todas las posibilidades educativas que ofrece la vida en sociedad. La Plataforma está fundamentada en las tres etapas de la formación del ingeniero geólogo:

1. **La formación de pregrado y el perfil amplio:** brinda una profunda formación en los aspectos básicos y básicos específicos, y desarrolla en el graduado de Geología los modos de actuación que le permite responder, a los problemas más generales y frecuentes que se presentan en la profesión.
2. **Preparación para el empleo:** Concebida y ejecutada en las entidades laborales con el propósito de continuar desarrollando y perfeccionando al graduado en Ingeniería Geológica, en sus modos de actuación profesional relacionados con su puesto de trabajo.
3. **Formación de postgrado:** la cual debe garantizar la formación permanente y la actualización de los graduados de esta carrera. De esta forma, la introducción de la formación continua en la Plataforma Didáctica del patrimonio geológico juega el papel fundamental para cada una de estas

etapas de la formación del ingeniero geólogo, brindando la posibilidad que los estudiantes y profesionales asumen un protagonismo real en este proceso.

El continuo incremento de la calidad en el proceso de formación Desde el diseño del primer plan de estudio de Ingeniería Geológica “plan C” hasta este plan E de cuatro años, el principio fundamental ha sido el incremento de la calidad del proceso de formación, este concepto se asume como la unidad dialéctica de dos elementos: excelencia académica y pertinencia. Los nuevos escenarios y condiciones complejas que se vislumbran para el siglo XXI, imponen la necesidad de que el diseño curricular propicie las condiciones para introducir los conocimientos y elementos del patrimonio geológico en la carrera, en aras de lograr una amplia cultura como un rasgo esencial de calidad en la formación del ingeniero geólogo de estos tiempos.

El concepto de formación integral.

En el caso particular del proceso de formación de los ingenieros geólogos se ha venido trabajando con la pretensión de lograr integrar en una concepción pedagógica coherente el pensamiento de nuestros más ilustres educadores, el **concepto de formación integral**, en términos de paradigma, se define de la manera siguiente: *“La formación integral de los estudiantes universitarios debe dar como resultado graduados con un sólido desarrollo político desde los fundamentos de la Ideología de la Revolución Cubana; dotados de una amplia cultura científica, ética, jurídica, humanista, económica y medio ambiental; comprometidos y preparados para defender la Patria socialista y las causas justas de la humanidad con argumentos propios, y competentes para el desempeño profesional y el ejercicio de una ciudadanía virtuosa.”*(DOCUMENTO BASE PARA EL DISEÑO DE LOS PLANES DE ESTUDIO “E”, MES, Junio 2016)

En el caso de la carrera de Ingeniería Geológica uno de los conceptos claves desarrollado en los colectivos de año ha sido **la unidad entre los aspectos educativos e instructivos en el proceso de formación:** En nuestro caso la introducción del patrimonio geológico en la carrera mediante una Plataforma Didáctica, permite una unidad dialéctica al conectar las disciplinas de la profesión como son la Geoquímica, Geodinámica, Geología Aplicada y las Practicas de la Profesión como elementos claves en la nueva cultura geológica que debemos lograr.

LA PLATAFORMA DIDÁCTICA DE LA FORMACIÓN DEL PATRIMONIO GEOLÓGICO EN LA CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA.

El patrimonio geológico es un tema complejo, e importante para la carrera de Ingeniería Geológica. El único registro histórico de la evolución se confirma en los materiales geológicos sobre los que se desarrolló y evolucionó el planeta Tierra, la vida, las rocas, los fósiles y los elementos del paisaje, los

procesos y fenómenos geológicos, procesos que intervienen en su modelado y las rocas, la sismicidad, y otros. En ellos reside la clave para la comprensión de los cambios y los acontecimientos que han ocurridos a lo largo de la Historia Geológica de nuestro planeta durante miles de millones de años.

El término patrimonio geológico, según lo recoge el Decreto 11 del Patrimonio geológico de Cuba, (2020), involucra a todos los recursos geológicos (formaciones estratigráficas, estructuras geológicas, formas, paisajes, yacimientos minerales y paleontológicos y otros), que posean un valor científico, cultural, educativo, paisajístico y recreativo, cuyo contenido permita estudiar e interpretar la evolución de la Tierra.

Para conocer en forma exhaustiva el patrimonio geológico de un área es indispensable realizar inventarios, archivar la información necesaria para su descripción y poder recoger datos de interés para mantener actualizados los inventarios. Figura 4.

De ahí, la necesidad de diseñar una Plataforma Didáctica del patrimonio geológico a implementar mediante las disciplinas de la profesión en la carrera de Ingeniería Geológica, como vía para garantizar la didáctica del patrimonio geológico en Cuba, Tabla 1.

Es en las disciplinas de la profesión donde concurre la unidad de la lógica interna de la Geoquímica, Geodinámica y Geología Aplicada con las otras disciplinas del proceso de enseñanza aprendizaje, garantizando una formación teórica-práctica dentro de su ámbito del saber y una aplicación de estos conocimientos en la resolución de problemas profesionales de la Ingeniería Geológica.

PAPEL DE LAS DISCIPLINAS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL DEL INGENIERO GEÓLOGO EN LA DIDÁCTICA DEL PATRIMONIO GEOLÓGICO.

El Plan de Estudio E, de Ingeniería Geológica comenzó a impartirse en el curso 2018 - 2019, las disciplinas de la formación profesional se integra en: Geoquímica, Geodinámica y Geología Aplicada, las que permiten desarrollar el modo de actuación de esta carrera. Representa el resultado de la integración de conocimientos y caracterizan un fuerte componente práctico que va desde primero a cuarto año, integran un sistema laboral investigativo que contribuye a la formación teórico práctica requerida del ingeniero geólogo de perfil amplio.

Estas disciplinas desarrollan un sistema de conocimientos, habilidades y valores en los estudiantes que garantizan su vínculo directo con el medio geológico, los georecursos, el geoambiente, lo que posibilitan un vínculo directo con el patrimonio geológico durante el proceso formativo; favorecen la “cultura del patrimonio geológico”, al preparar a los estudiantes para en su identificación y protección según determinadas características, entre las que se desatacan:

- ✎ La formación geológica básica del ingeniero geólogo, expresado en los objetivos, los conocimientos, las habilidades y la formación de valores, dirigido hacia el desarrollo sostenible sobre la base del respeto, cuidado y protección del entorno.
- ✎ La educación en los estudiantes para el cuidado y protección del ambiente.
- ✎ El desarrollo un componente laboral investigativo, que facilita el vínculo de los estudiantes con el patrimonio geológico.
- ✎ La carrera posee un colectivo de profesores de experiencia, con una sólida preparación docente y científico – metodológica, unido a jóvenes que inician en la docencia universitaria.
- ✎ Carrera que se imparte en el curso regular diurno y por encuentros.
- ✎ Los contenidos de las disciplinas de la carrera responden a los problemas profesionales y al sistema de competencias profesionales, los que están en correspondencia con el patrimonio geológico.
- ✎ El proceso de integración de los contenidos del patrimonio geológico según las diferentes disciplinas de la profesión crea la necesidad de incluir enfoques intra, inter y transdisciplinarios.
- ✎ Esta Plataforma Didáctica permite un mejor inventario y catalogación de sitios de interés geológico y admite ampliar el conocimiento, conservación, protección y la utilización científica, turística, y didáctica del patrimonio geológico nacional.



Formación Los Cedros, del Guamuha. Cienfuegos. Foto tomada del Servicio Geológico de Cuba / Cubadebate



Formación Santa Teresa, Villa Clara. Foto tomada del Servicio Geológico de Cuba / Cubadebate



Fósiles en la región Moa-Baracoa riqueza geológica, de alto valor paleontológico.



Estratificación Recreo, Municipio Baracoa, estratificación cruzada, calcarenitas.

Figura 4. Diferentes formas de patrimonio geológico.

Las disciplinas profesionales de la carrera de Ingeniería Geológica según la Plataforma Didáctica propuesta, están identificadas en el documento rector del plan de estudio E, las mismas contribuyen a desarrollar mejor la personalidad del estudiante y el logro de sus competencias profesionales. En ellas se integran los contenidos geológicos patrimoniales esenciales que las enriquecen, que están en correspondencia con propósitos que se derivan del modelo del profesional y que brindan una formación más integral al estudiante, en respuesta a las exigencias científico-técnicas y sociales.

Cada disciplina refleja sus características más importantes y constituye la descripción sistemática y jerárquica de los objetivos generales a lograr y de los contenidos esenciales a asimilar, así mismo define las habilidades y los valores a desarrollar por cada una de ellas.

En la Tabla 1, se evidencia el rol de estas disciplinas en el tratamiento de los elementos geológicos patrimoniales en la carrera de Ingeniería Geológica; exponiéndose las habilidades a desplegar por los estudiantes. Las habilidades de, identificar, clasificar y proteger el patrimonio según las disciplinas de la carrera como: Geoquímica, Geodinámica y Geología Aplicada. La Geoquímica, los minerales, rocas y meteoritos, la Geodinámica, el paisaje, las estructuras geológicas, los fósiles, las formaciones geológicas, los procesos y fenómenos geológicos y la Geología Aplicada, los yacimientos minerales sólidos, gaseosos, petroleros, acuíferos, riesgos geológicos, y los terrenos estables para la construcción, con determinados valores científicos, educativos, recreativos, turísticos, cuyo contenido admite estudiar e interpretar la evolución del medio geológico.

Tabla 1. Plataforma Didáctica para favorecer el conocimiento del patrimonio geológico, en la carrera de Ingeniería Geológica, Plan E de cuatro años.

DISCIPLINA	CONOCIMIENTOS	Elementos del Patrimonio geológico	HABILIDADES	VALORES	EJEMPLOS
Geoquímica	Geoquímica de la corteza terrestre en la región MEDIO GEOLÓGICO Minerales, Rocas y Meteoritos	Geoparques, Geositios, Muestras geológicas o colecciones de estas	1. Catalogar los Minerales, Rocas y Meteoritos, geositios y muestras geológicas para identificar los que puedan ser incluidos como parte del patrimonio geológico. 2. Determinar las acciones para garantizar su protección.	Responsabilidad laboriosidad y patriotismo	Gabros estratificados de Moa Museo de mineralogía y petrografía Universidad de Moa
Geodinámica	La Tierra en espacio y tiempo. Procesos y fenómenos geológicos. Procesos de modelado del terreno Medio Geológico. Origen y evolución de la Tierra, estructuras de la corteza terrestre. Relieve. Procesos geológicos endógenos y Procesos geológicos exógenos. Estratigrafía y sedimentación	Geoparques, Geositios, Afloramientos Fósiles y sus colecciones. Evolución de la vida. Paisajes del pasado y presente. Formaciones geológicas. Estructuras estratigráficas	1. Evaluar los procesos y fenómenos geológicos y los procesos de modelado del terreno para identificar geositios y geoparques, estructuras estratigráficas y otros que se destacan para que puedan ser incluidos como parte del patrimonio geológico. 2. Determinar las acciones para garantizar su protección.	Responsabilidad ad, laboriosidad y patriotismo.	Geo parque Viñales, Terrazas costeras de Guantánamo. Macizo cársico de Matanza. Valle del Rio Yurumí. Baracoa - Guantánamo
Geología Aplicada	Recursos geológicos, depósitos de minerales sólidos, de petróleo y gas Agua y sus fuentes, acuíferos. Geotecnia y Geo mecánica del medio Medio Geológico Yacimientos minerales útiles. Yacimientos gasopetrolíferos. Tipos de acuíferos. Materiales de la construcción. Estabilización de obras ingenieras y de la construcción	Geoparques Geositios, Muestras y sus colecciones. Geositios Ingeniero Geológico.	Recursos geológicos, depósitos de minerales sólidos, de petróleo y gas Agua y sus fuentes, acuíferos, para identificar los que puedan ser incluidos como parte del patrimonio geológico. 2. Determinar las acciones para garantizar su protección	Responsabilidad ad, laboriosidad y patriotismo.	Cortezas de los yacimientos de níquel y cobalto de Moa. Complejos acuíferos cársicos de Ciego de Ávila y Camagüey. Cuenca gaseo - petrolífera Guanabo/Varadero. Trasvase este-oeste de Pinares de Mayarí, Holguín.

Como parte de la preparación que se requiere lograr en los estudiantes de la carrera a favor del conocimiento del patrimonio geológico, es imprescindible el desarrollo de habilidades que les permitan identificar los elementos geológicos con valor patrimonial. Con este fin se presentan en la Tabla 2, aquellas a tener en cuenta como parte del proceso docente educativo de la carrera Ingeniería Geológica.

Tabla 2. Habilidades a desarrollar en los estudiantes de la carrera Ingeniería Geológica, para clasificar el patrimonio geológico, según la metodología elaborada por (Gutiérrez, et. al., 2007)

Disciplina	Identificar	Clasificar	Proteger	Elementos del patrimonio geológico
Geoquímica	Muestras macroscópicas y microscópicas de minerales y rocas	La génesis de los minerales y rocas	Los diferentes recursos minerales y rocas	Muestras, geositios, Geoparques
Geodinámica	Muestras de fósiles, Geositios Geoestructuras y estratigráficos. Historia geológica del medio.	Procesos y fenómenos geológicos. Formas del paisaje. Geoestructuras locales. Fósiles. Estratos y sedimentos	Los diferentes elementos geodinámicos del medio geológico	Muestras geológicas, fósiles, afloramientos, geositios, Geoparques,
Geología Aplicada	Muestras de menas. Geotopos de interés minero metalúrgico y energético. Sitios de riesgos geológicos.	Menas y yacimientos minerales sólidos, petróleo y gas, acuíferos. Zonas estables a la construcción	Explotación racional y sostenible de los yacimientos minerales sólidos, acuíferos y energéticos. Reducción de riesgos de desastres geológicos.	Muestras geológicas, afloramientos, sitios de interés geológicos, Geoparques. Diferentes geotopos de interés como georecursos.

En el proceso de aplicación de la Plataforma Didáctica es esencial la labor educativa que desarrolle el profesor al introducir los conocimientos del patrimonio geológico, para lograr que los estudiantes se sientan interesados por la adquisición de nuevos conocimientos relacionados con su perfil profesional y más responsables de su proceso de aprendizaje.

DISCUSIÓN

El diseño de una Plataforma Didáctica para la carrera Ingeniería Geológica, facilita la incorporación de la didáctica del patrimonio geológico al proceso formativo de la carrera Ingeniería Geológica, mediante los contenidos de las disciplinas y asignaturas por parte de los docentes. A su vez, favorece la identificación del patrimonio geológico y su protección.

Después de lo descrito en los párrafos anteriores, se considera que existe una necesidad de realizar importantes aportes desde las diferentes disciplinas de la Geología, con estudios orientados al conocimiento integral del “patrimonio geológico”. Este conocimiento contribuirá a la concreción de políticas específicas para la identificación, conservación, protección y utilización adecuada de los mismos a nivel nacional, provincial, local, y de esa forma transformarlo en función del desarrollo sostenible.

La Plataforma Didáctica diseñada, fundamentada a través de las disciplinas profesionales de la carrera permitirá un progreso hacia el inventario y catalogación de sitios de interés geológico y puede resultar un camino eficaz para el conocimiento, conservación, protección y la utilización científica, didáctica y turística del patrimonio geológico de la Región Oriental de Cuba.

La utilización de las disciplinas Geoquímica, Geofísica, Geodinámica, Geología Aplicada y Prácticas Profesionales generan un mayor conocimiento de estos sitios de interés geológico, constituyendo un método adecuado y sencillo para la conformación de una base de datos a nivel nacional, provincial o municipal y a su vez elevar la capacidad de estos profesionales para resolver problemas relacionados con el patrimonio geológico, mediante su desempeño laboral.

El desarrollo de la didáctica del patrimonio geológico mediante las disciplinas profesionales permitirá identificar nuevas zonas de interés turístico existentes en la Región Oriental, para su puesta en valor turístico y de esa manera contribuir al desarrollo económico de la región.

La incorporación de la Plataforma Didáctica de formación patrimonial a la carrera permitirá identificar nuevos geositios, colecciones de muestras geológicas y la creación de geoparques, que permitan incentivar en la población el interés y el conocimiento por los distintos procesos geológicos que han tenido lugar a través del tiempo y de forma general incentivar el conocimiento por la Geología, los georecursos y el ambiente.

CONCLUSIONES

La didáctica del patrimonio geológico se erige como una alternativa metodológica para integrar el patrimonio geológico al proceso formativo de la carrera Ingeniería Geológica.

La Plataforma Didáctica propuesta favorece desplegar la didáctica del patrimonio geológico, mediante las disciplinas de la profesión del ingeniero geólogo.

El tratamiento didáctico del patrimonio geológico favorece la adquisición de conocimientos, habilidades y valores en relación con el patrimonio geológico en los estudiantes.

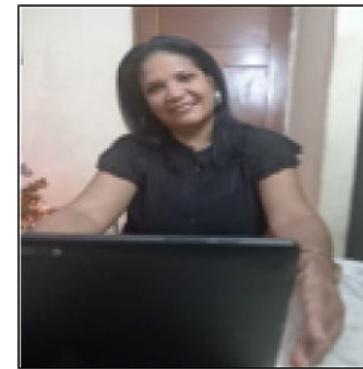
Se reconoce la necesidad de preparar a los profesionales de la Geología, para identificar, conservar y proteger el patrimonio geológico y de este modo garantizar la identificación de sitios de interés geológico, geoparques y colecciones de muestras geológicas, que puedan ser aprovechadas por su valor educativo, científico, cultural o turístico.

BIBLIOGRAFÍA

- Díaz, M. E., Guillen, M. F., Mata, P. J. M., Muñoz, B. P., Nieto, A. L. M., Pérez, L. F y Santisteban, D. B. C. (2008). Nueva legislación española de protección de la naturaleza y el desarrollo rural: implicaciones para la conservación y gestión del patrimonio geológico y la geodiversidad. *Geo-tema*. (10), 1311-1314.
- Guardado, R.; Blanco, R.; Rodríguez, R. (2003). *Evaluación y Conservación del Patrimonio Geológico-Minero en Cuba*. Patrimonio Geológico y Minero en el Contexto del Cierre de Minas. CETEM/ IMAAC/CYTED. Río de Janeiro Brasil, p. 203 - 214 URI: <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/2493>
- Guardado, Rafael.; Virginia Costa, V. Evaluación y conservación del patrimonio geológico minero en Cuba www.monografias.com <https://www.monografias.com/trabajos102/evaluacion-y-conservacion-del-patrimonio-geologico-a-minero-cuba/evaluacion-y-conservacion-del-patrimonio-geologico-a-minero-cuba.shtml>
- Guerrero, D.; Guardado, R. & Blanco, R. 2003: La conservación del patrimonio geológico-minero como medio para alcanzar el desarrollo sostenible. *Minería y Geología* 19(3-4). Consulta: 21 dic 2014. En: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/358>
- Ministerio de Educación Superior (2016). Documento base para el Diseño de los planes de estudio "E" La Habana, Cuba.
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Decreto 11: Del Patrimonio Geológico de Cuba*. Gaceta Oficial Ordinaria de la República de Cuba No 69. Recuperado de <http://www.gacetaoficial.gob.cu>
- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Resoluciones 81 y 82 /2020*. Gaceta Oficial Ordinaria de la República de Cuba No 69. Recuperado de <http://www.gacetaoficial.gob.cu>
- Santos, E. M. d. I. (2013). *El patrimonio industrial minero en Corrales de Aljaraque*. Tesis Doctoral. Universidad de Huelva, España.
- Superior, M. d. E. (2019). *Modelo del profesional de Ingeniería Geológica. Plan de Estudios E*. Universidad de Moa.

Unidas, C. G. d. N. (1972). Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural. Paris.

Unidas, C. G. d. N. 2016: *Resolución 70/1. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Consulta: 3 de sep. de 2020. Recuperado de: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es>.



Yaritza Aldana Aldana (MS.c) es Profesora Auxiliar del Departamento Ciencias de la Información, Universidad de Moa. Se vincula al estudio del patrimonio geológico desde el año 2010. Ha publicado varios artículos sobre esta temática en revistas científicas cubanas y extranjeras. Como ponente ha participado en eventos nacionales e internacionales. Sus contribuciones científicas abordan el valor didáctico del patrimonio geológico, el papel del patrimonio y la geodiversidad en la formación del geólogo cubano. <https://orcid.org/0000-0002-9986-281X>



Dr. Rafael Guardado Lacaba es Profesor Titular, Profesor Consultante de la Universidad de Moa Holguin Cuba Departamento de Geología orcid.org/0000-0003-1075-8176 Académico Titular de la Academia de Ciencias de Cuba Doctorado en la Universidad Minera de St Petersburgo (Leningrado) Rusia Graduado en la Universidad de Oriente en Ingeniería Geológica Presidente de la Comisión Nacional de la Carrera de Ingeniería Geológica Vice Presidente del Tribunal Nacional de Geología, Geofísica y Minas Orden Carlos J Finlay. Profesor de Mérito de la Universidad de Moa Coordinador de la Red Iberoamericana CYTED de Reducción de Riesgos por Deslizamientos. Ha publicado artículos y libros de Ingeniería Geológica.



Enio Felipe Robas Día es Profesor Titular y Doctor en Ciencias Pedagógicas. Graduado de maestro primario y de Secundaria Básica Licenciado en Español - Literatura y en Pedagogía - Psicología,. Presidente de la Asociación de Pedagogos de Cuba en la provincia de Guantánamo. Profesor del Instituto Superior Pedagógico en las disciplinas de Formación Pedagógica General y de la Universidad de Guantánamo, Pedagogía, Diseño Curricular, Comunicación, Autoestima, Metodología de la Investigación y Educación de la Sexualidad. autor de numerosos artículos, así como publicaciones en revistas científicas. <http://orcid.org/0000-0003-1912-4823>

Tiempo geológico y tiempo humano; el Tiempo del Universo y el Tiempo de la consciencia

Salvador Ortuño Arzate
Colaborador de la Revista

“Quid est ergo tempus? Si nemo ex me quaerat scio, si quaerenti explicare velim nescio.”

“¿Qué es, por tanto, el tiempo? Si nadie me lo pregunta lo sé; si me lo preguntan y quiero explicarlo, ya no sé, lo ignoro.”

Agustín de Hipona
Confesiones, libro XI, cap. XIV.

“Para nosotros, físicos convencidos, el tiempo no es más que una ilusión, por persistente que parezca.”

Albert Einstein

La Geología descubrió el tiempo inscrito en las rocas y lo introdujo en el pensamiento humano, en la filosofía, y en todas las ciencias.

Ἐγώ εἶμι

RESUMEN

Una noción que el hombre ha deseado vehementemente aprehender, y que ronda el más profundo enigma, es la del tiempo. ¿Pero, qué es el tiempo? Para el ser humano, a lo largo de la historia, el tiempo ha sido el fluir de los instantes, los días, los años... de su fugaz y conjeturada existencia en esta vida. Ésta es la percepción del tiempo en la consciencia humana. Pero, ¿sobre qué sustento material se podía fundamentar el fluir del tiempo? ¡Eureka, la Geología encontró su huella impresionante en las rocas! Los primeros geólogos se sintieron arrobados por tan inconmensurable evidencia de la temporalidad; y fueron construyendo su prodigioso calendario geológico. El siguiente paso no se dio en la Tierra, sino mirando al cielo, a las estrellas. En la postmodernidad la concepción del tiempo se nos ha revelado en la consciencia, por la Geología y la Cosmología. En este contexto, volaremos, a través este breve texto y del tiempo, tratando de escudriñar las relaciones intrínsecas entre estas concepciones de tan metafórico, pero excitante misterio.

1.- INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre camina sobre la faz de la Tierra, sus reflexiones y pensamientos han estado dirigidos a entender su lugar en la eternidad, percibida como la abstracción del tiempo. Empero, el ser humano percibía el tiempo de sus días, en su consciencia, y lo anclaba en la inmensidad misteriosa e insondable del tiempo eterno y profundo, el cual presentía más allá de su entorno natural inmediato. Sin embargo, no sabía discernir qué es el tiempo absoluto; y se

puede considerar que, aun en la actualidad, el hombre aún no sabe qué es realmente este misterio.

Abordar el discernimiento, la comprensión del tiempo es problema aporístico, insalvable. Es complicadísimo encontrar caminos para abordar su análisis. El ser humano se mueve en el tiempo percibido por su consciencia, y lo “percibe” como experiencia de vida, tiempo real, tiempo externo, eternidad, etc. Desde las culturas clásicas se ha tratado de abordar el tiempo, desde Heráclito, Platón, Aristóteles, hasta Heidegger y Sartre. Finalmente, a lo largo de la historia humana, la comprensión del tiempo parece devenir siempre en una pavorosa aporía.

Durante el desarrollo del conocimiento humanístico-filosófico, y científico reciente se ha logrado concebir una noción renovada del espacio-tiempo, lo cual ha influido en la apreciación ontológica, o del ser, en el tiempo y su temporalidad. Las ciencias como la Geología, la Física moderna y la Cosmología han creado nuevas nociones conceptuales, sin ser concluyentes aún sobre el significado real de tiempo. La Geología ha descubierto el tiempo relativo grabado en las rocas, como la primera aproximación científica al enigma. La Cosmología, indirectamente, ha tratado de medir el tiempo entre los modelos matemáticos y la física de las galaxias. Sin embargo, a pesar de tales progresos, el anhelo humano - ontológico por comprender el tiempo, al parecer, no ha sido satisfecho.

2.- EL TIEMPO PERCIBIDO POR LA CONSCIENCIA; BREVE VISIÓN HISTÓRICA

Las nociones de tiempo durante la historia del pensamiento y la filosofía

Percepciones humanas sobre el tiempo acaecen según la función de la consciencia a través de la percepción, generando la experiencia de la intuición. Las concepciones del tiempo en la Filosofía nacen de las intuiciones de la consciencia, ya que, epistemológicamente, no es posible efectuar aprehensiones verificables sobre tan singular objeto del conocimiento.

Desde los albores de las civilizaciones primigenias, durante las épocas de las culturas clásicas, el ser humano tenía explicaciones o discernimientos lógicos sobre el tiempo; éste era un ente insondable, pero presente y definiendo, o intuyendo, incluso su relación con el espacio (cf. Heráclito, Parménides o los atomistas griegos). En la cultura griega el tiempo, en general, es llamado Cronos (Χρονος); en hebreo es ‘Olam. En la literatura antigua siempre perviven referencias al tiempo primigenio. En la Biblia hebrea, el tiempo es tratado como una flecha con un inicio y un final de la historia, tanto humana como de la naturaleza. Similar significado tiene en los textos antiquísimos como *La Epopeya de Gilgamesh*, por ejemplo.

Desde la más remota antigüedad, el poeta Hesíodo plantea que el mundo surgió de una inmensa oscuridad que llamó Caos, en sus elementos formadores, a saber: Gea, Tártaro, Érebo, Eros y Nix. De la unión de Gea y Urano surgió Cronos, la entidad divina que sustentaba la existencia y el ordenamiento del cosmos¹. Cronos (Χρονος, el tiempo), deviene, desde entonces, la más profunda y urgente problematización ontológica que enfrenta el ser humano.

¹ Hesíodo, 1978.- *Teogonía*. Versión de Paola Vianello de Córdoba. Bibliotheca Scriptorvm Graecorum et Romanorum Mexicana, UNAM.

Así, durante el periodo denominado de los presocráticos, los griegos comienzan a reflexionar más insistentemente sobre la naturaleza, el firmamento, los astros; y así intuyen que el cosmos, su entorno, estaba ordenado por leyes, conformando una historia cosmogónica infinita. Entre estos filósofos de la naturaleza, la obra de Heráclito (ca. 500 a. C.), destaca en esta búsqueda por explicar el Universo y el tiempo. Al parecer, la concepción de Heráclito sobre el tiempo corresponde a una noción de “fluidez”, de un ente que fluye. Al respecto, se hace alusión a la frase, del fragmento 91: “Uno no se puede bañar dos veces en el mismo río.” Es decir, todo corre, nada permanece. Entonces, “los que descienden a los mismos ríos, reciben aguas siempre nuevas.” (Fragmento 12)². Esta noción del mundo significa que existe una transformación incesante de las cosas, de la materia y, por tanto, de la energía. El tiempo para Heráclito es el eterno devenir; un devenir lineal. En el devenir, el Logos (Λόγος) es la ley según la cual suceden todas las cosas (fragmento 1); “él gobierna el mundo”, (fragmento 72)³. Zenón de Elea, en sus aporías establece que: “la flecha, en el proceso de estar en movimiento, se encuentra en estado estacionario. Ésta es la consecuencia de suponer que el tiempo está compuesto de instantes.”⁴

Platón, en el *Timeo (Diálogos)*, exclama una bella metáfora del tiempo: “la imagen móvil de la eternidad.” Para Platón, “el tiempo... surgió con el Universo, simultáneamente.”⁵ El tiempo es la eternidad, lo insondable. Y el mundo-cosmos es el Logos. Según Platón, “el demiurgo trató de hacer una especie de imitación móvil de la eternidad, la cual es el tiempo. La eternidad es inmóvil, es el permanecer en sí mismo; un eterno presente dado todo de una vez, pero el tiempo es movimiento, cambio; y se mueve porque al carecer de perfección, no puede permanecer en sí mismo. Pero el tiempo refleja la eternidad, que es su modelo...”⁶

Por otra parte, Aristóteles, quien elabora el primer análisis formal del tiempo, lo establece como sigue: “Pues esto es el tiempo: número del movimiento según lo anterior y lo posterior”, (...τοῦτο γὰρ ἔστιν ὁ χρόνος, ἀριθμὸς κινήσεως τὸ πρότερον καὶ ὕστερον.)⁷ También, en su método, Aristóteles aduce que el pasado ya no existe, el futuro, aún no es; y el presente (el ahora, instante o el *vũv*, para Aristóteles) no existe tampoco, porque son instantes, como puntos, y los puntos no existen. Aristóteles aborda el tiempo, pero con relación al ser y al movimiento. El cambio (o movimiento) de los entes se da en el tiempo; y éste existe si hay movimiento. Cada consciencia percibe su propio tiempo a través del cambio en sí. La consciencia es la que ejerce el acto de medir el tiempo, compuesto de instantes. He aquí la pertinencia de la sentencia de Protágoras: “el hombre es la medida de todas las cosas” (Πάντων μέτρον ἄνθρωπος), es decir, las cosas son los entes que percibe la consciencia. El intelecto humano “lee” (*intellegit*), o percibe el tiempo en intención de cuantificarlo o medirlo. Asimismo, para Aristóteles, el tiempo y el espacio son continuos, ya que se estructuran en un antes y un después, en la infinitud del tiempo y del mundo (espacio).

² Brun, J., 1995.- *Los presocráticos*. Colección ¿Qué sé?, Publicaciones Cruz O.S. A. y Consejo Nacional para la Cultura y las Artes., pp.54.

³ Brun, J., *Ibidem*, pp.49.

⁴ Brun, J., *Ibidem*, pp.90.

⁵ Platón, 1962.- *Timeo, Diálogos*. Ed. Porrúa, México., pp. 663-721.

⁶ Ortiz G. J., 2016.- *Los Elementos del Concepto de Tiempo Aristotélico en la Teoría de la Relatividad*. Tesis doctoral. Universitat Abat Oliba CEU, Facultad de ciencias Sociales. pp. 24.

⁷ Aristóteles, *Metafísica*, IV, II, 219 y ss.

En las *Confesiones*, Agustín de Hipona asienta un tratamiento filosófico sobre el tiempo. Su análisis le lleva a sostener la inexistencia del tiempo pasado y futuro, considerando como real existente sólo el presente. Asocia el tiempo al movimiento, del cual el tiempo es la medida. Establece que el tiempo es obra de Elohim y surge en el instante de la creación; siendo Elohim preexistente al tiempo y asimilado a la eternidad.⁸ “Si el presente estuviera siempre presente, si no fuera a reunirse con el pasado, ya no sería tiempo, sería eternidad”⁹.

Después, durante el Renacimiento de las ideas, con Copérnico, Kepler, Descartes, Galileo y Newton, el conocimiento sobre la naturaleza y el sistema solar y sus planetas, permitirá iniciar un discernimiento más amplio sobre las nociones de tiempo. Y es, justamente, el descubrimiento de algunas leyes de la naturaleza y los procesos geológicos, que se comienza a discernir nuevas nociones sobre el tiempo humano, como parte ínfima del tiempo profundo del planeta y del cosmos.

Isaac Newton (1642-1727), en *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Principios Matemáticos de la Filosofía Natural)*, establece las nuevas relaciones entre la materia, su movimiento y las fuerzas físicas como la gravedad en los enunciados de sus cuatro leyes fundamentales. Newton percibe al espacio y al tiempo como entidades esenciales ontológicas (universales reales, objetivas y matemáticas), primigenias *per sé*, conteniendo toda la materia y la energía existentes. Considera también que: “el tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí y por su propia naturaleza, sin relación a nada externo, fluye uniformemente, y se lo nombra como duración. El tiempo relativo, aparente y vulgar es una medida sensible y exterior (precisa o desigual) de la duración mediante el movimiento, usada por la gente en lugar del verdadero tiempo: hora, día, mes y año, son medidas semejantes.”¹⁰ Para Newton, hay dos tiempos: el absoluto o universal que lo contiene todo; y el tiempo relativo, el de la percepción de la consciencia y los eventos sucesorios de los entes y las cosas. Así, el tiempo que se mide (por la consciencia) es relativo, o subconjunto, al tiempo absoluto eterno y universal. Este tiempo absoluto preexiste a toda la materia. El tiempo absoluto es eternidad y el espacio absoluto es infinitud, y por tanto en infinitud y continuidad. El cosmos posee un principio en el tiempo, sin embargo, no hay un principio del tiempo. Considera Newton que: “*Tempus et spatium sensorium Dei sunt.*” (“El tiempo y el espacio son atributos de Elohim”).

De esta manera, el tiempo y el espacio relativos (no el tiempo absoluto), para Newton, Kepler y la mecánica celeste clásica, son entidades medibles y que se relacionan con las variables de los fenómenos físicos de la naturaleza; y cuya expresión funcional son relaciones matemáticas. *Grosso modo*, este es el paradigma newtoniano-kepleriano que estableció la predictibilidad o retrodictibilidad científicas en la mecánica celeste y que influyó grandemente, hasta la actualidad, en la visión determinista de las ciencias naturales (caso de la Geología) y exactas (física, química y matemática). La naturaleza está siempre en armonía con sí misma, (“*Natura est semper sibi consona.*”).

Para Immanuel Kant (1724-1804), en su estética trascendental (doctrina de la sensibilidad, αισθητικός, sensible), parte de su *Crítica de la Razón Pura*, el tiempo y el espacio son esencias

⁸ Agustín de Hipona, *Confesiones*; libro XI, 14-15.

⁹ Agustín de Hipona, *Ibidem*, XI, 14-15.

¹⁰ Newton, I., *Principios matemáticos de filosofía natural*. In Ortiz G. J., 2016.- *Los Elementos del Concepto de Tiempo Aristotélico en la Teoría de la Relatividad*. Tesis doctoral. Universitat Abat Oliba CEU, Facultad de ciencias Sociales. pp. 88.

a priori (conocimiento independiente de toda experiencia), o formas puras de la intuición sensible; mas no cualidades externas. El conocimiento puro es aquel al cual no se ha adicionado ningún conocimiento empírico. En la teoría trascendental el tiempo y el espacio integran las categorías y las ideas regulativas. En su visión epistemológica, tiempo y espacio corresponden a la teoría trascendental elemental. Tiempo y espacio, para Kant, son leyes de la consciencia, universales y necesarias. El tiempo para Kant es una intuición pura, en el sujeto cognoscente, que le permite los juicios sintéticos. Así, los fenómenos (φαινόμενον, lo que se manifiesta materialmente) y los núómenos (νοούμενον, lo que no se manifiesta materialmente) son percibidos por la consciencia. Son eventos *en sí* que tienen representación sólo en el espacio y en el tiempo.¹¹ La sensibilidad de la consciencia hace posible las intuiciones; y el entendimiento humano es la fuente de los conceptos. En el caso del tiempo, éste tiene la representatividad de una línea recta real (referida en números reales), e infinita y de sucesión. La percepción del tiempo se logra a través de relaciones temporales de los fenómenos, y las cuales se manifiestan por analogías, como la duración, sucesión y coexistencia. Este es el contexto de los excepcionales avances de diversas ciencias físicas, humanísticas y de la naturaleza, y donde se inscribe el nacimiento fundamental de la Geología y del descubrimiento del tiempo geológico.

Para Gottfried Leibniz, el tiempo es una relación de orden entre fenómenos sucesivos y, por su parte, el espacio es el orden entre fenómenos coexistentes. Es el modelo del tiempo relacional y basado en el orden, sea sucesorio de los eventos en el tiempo o co-existencial de las cosas. En cambio, para Georg Hegel (1770-1831), el tiempo es el Espíritu desplegándose.¹² Hegel, declara que el espacio y el tiempo constituyen un todo unido. Pero, “el verdadero presente es la eternidad.”¹³

Henri Bergson (1859-1941), filósofo francés, considera que el problema de dilucidar el tiempo, es el problema esencial de la metafísica u ontología. El tiempo es el problema toral de la filosofía. Bergson asume su postura filosófica *vis-à-vis* del tiempo, en el marco del impacto de la teoría de la relatividad especial de Einstein, al inicio del siglo XX. El tiempo para Bergson se materializa en duración real, la cual es movimiento y cambio constante, sin concatenación de momentos concretos. Propone la intuición como una forma de aprehensión de la realidad “en su pureza originaria, como duración continua, heterogénea y creadora, sin la mediación de símbolos que, por su carácter espacial, distorsionan la mencionada aprehensión.” El tiempo es una sucesión de instantes adheridos en una continuidad indivisible y lo cual constituye una duración verdadera.¹⁴ La duración (*la durée*) es lo que cambia por naturaleza, y es sólo heterogeneidad. Bergson confirma su concepto de un tiempo universal: “una misma duración que abarca todas las duraciones y según la cual dos flujos -exteriores el uno con respecto al otro-, son simultáneos cuando ocupan la misma duración, al insertarse ambos en la duración de un tercero -que es el flujo de nuestro discurrir psicológico.¹⁵ Es en la *Evolución Creadora (L'Évolution Créatrice)*, su obra principal, donde Bergson despliega los conceptos sobre la

¹¹ Kant, E., 1987.- *Crítica de la razón pura*. Ed. Porrúa., pp. 42-57.

¹² Navarro, E. V., 2006.- *El tiempo a través del tiempo*. Athenea Digital, no. 9, 1-18.

¹³ Hegel, W., F., 1997.- *Enciclopedia de las Ciencias Filosóficas*. Editorial Porrúa., pp. 162-163.

¹⁴ Ortiz G. J., 2016.- *Los Elementos del Concepto de Tiempo Aristotélico en la Teoría de la Relatividad*. Tesis doctoral. Universitat Abat Oliba CEU, Facultad de ciencias Sociales. pp. 287-289.

¹⁵ Ortiz G. J., Ibidem, pp. 293.

durée y sus implicaciones para el ser; la cual es sucesión, continuidad y constitución, creación e incesante novedad; esto es el tiempo.

De acuerdo con Gaston Bachelard (1884-1962), el tiempo percibido por la consciencia se compone de instantes; éstos conforman una duración, es decir, una adición de instantes. Expresa Bachelard: “*Le temps n'a qu'une réalité, celle de l'instant.*” Es decir, “el tiempo no es más que una realidad: la del instante.”¹⁶

Durante el siglo XIX y XX, son notables las obras de Friedrich Hegel, Martin Heidegger, Jean Paul Sartre y Jean Gitton, como la *Fenomenología del Espíritu (Phänomenologie des Geistes)*, *Ser y Tiempo (Sein und Zeit)*, *El Ser y la Nada (L'être et le Neant)*, y *Lo Absurdo y el Misterio*, respectivamente. Así, Heidegger menciona que “el tiempo es comprendido como una secuencia, como el “fluir” de los *ahoras*, como el curso del tiempo”.¹⁷ Aunque, Heidegger, en realidad, se adhiere a la concepción aristotélica del tiempo.

Según Jean Paul Sartre (1905-1980), ni el pasado ni el futuro tienen existencia objetiva. Además, el presente sólo es “el límite de una división infinita, una suerte de punto sin dimensión...y, por tanto, no es en absoluto.”¹⁸ “Un punto sin dimensión no es espacio, un instante sin duración no es tiempo.”¹⁹

Sin embargo, desde la antigüedad hasta la postmodernidad, la filosofía no ha podido resolver el problema de una explicación del tiempo. La ciencia, al parecer, sólo ha realizado algunas aproximaciones. Ésta solamente ha tratado de medir periodos de tiempo, como en el caso de la Geología y en la Cosmología; aunque solo por aproximaciones a veces erráticas, imprecisas y cambiantes.

3.- EL TIEMPO MANIFIESTO EN LOS PROCESOS GEOLÓGICOS Y COSMOLÓGICOS; EL CAMBIO DE LA MATERIA Y LA ENERGÍA

3.1.- Tiempo Geológico: Absoluto y Relativo en Geología

Por otra parte, ya en el siglo XVII y principalmente durante el XVIII y XIX, la Tierra empieza a ser concebida como un planeta dinámico, que se inscribe en un espacio temporal infinito. El tiempo se vuelve infinito e intangible, cuya base conceptual fue constituida a partir de la concepción de las leyes y los procesos geológicos observados por los primeros naturalistas. Aunque estas ideas sobre el tiempo eran entonces aún incipientes, constituyeron un gran paso conceptual que influyó el desarrollo de las diferentes ciencias humanas y físicas durante los siglos XVIII y XIX. El estudio de las rocas, los estratos, las estructuras y los procesos geológicos que realizaron los pioneros naturalistas como James Hutton, Werner, Charles Lyell, Georges Cuvier, Éli de Beaumont, etcétera, fundamentaron la necesidad de concebir la

¹⁶ Bachelard, G., 1965.- *L'intuition de l'instant. Introduction a la poétique de Bachelard*. Editions Denoël.

¹⁷ Heidegger, M., 2009.- *Ser y Tiempo*. Editorial Trotta., pp. 434.

¹⁸ Sartre, J. P., *L'être et le néant. Essai d'ontologie phénoménologique*. Tel Gallimard. Inicialmente dans la Bibliothèque des Idées en 1943., pp.156-158.

¹⁹ Comte-Sponville, A., 2001.- *¿Qué es el tiempo? Reflexiones sobre el presente, el pasado y el futuro*. Traducción de Pierre Jacomet. Editorial Andrés Bello., pp. 50.

existencia de un tiempo inmenso, a fin de poder explicar, e interpretar, tan significativos cambios en la fisonomía y los relieves de la Tierra, como la erosión modeladora del relieve terrestre, el transporte de sedimentos a las áreas marinas y oceánicas y la elevación de las cadenas montañosas para compensar la pérdida de los materiales erosionados. Además, los procesos geológicos perenes y cíclicos observados requerían ser insertos en grandes periodos de tiempo. Y la humanidad, y su concepto de tiempo humano quedaba, entonces, circunscrita a esa inmensidad de tiempo que la evolución de la Tierra evidenciaba de manera contundente.

Las primeras investigaciones sobre el tiempo geológico: Hutton y Lyell

James Hutton fue un agudo observador de la naturaleza, notablemente perceptivo, ya que escudriñó profundamente las rocas, estratos, fósiles y estructuras geológicas, tratando de interpretar y comprender los procesos que les dieron origen. Observó detenidamente los procesos naturales que actúan sobre la superficie de la Tierra, como la erosión, el transporte de sedimentos, el depósito, la actividad volcánica, etcétera. Hutton comprendía, o interpretaba, los cambios de la Tierra como los procesos en una máquina eterna, estableciéndose un equilibrio entre el desmantelamiento y erosión de las tierras continentales y montañas y las fuerzas dinámicas internas del planeta que elevaban las áreas erosionadas. Hutton expresó: "Desde lo alto de la montaña hasta la costa del mar...todo se haya en estado de cambio".²⁰

El descubrimiento de Hutton fue la ciclicidad de los procesos sobre la superficie del planeta, concluyendo que se necesitaban grandes lapsos de tiempo ilimitado para explicar estos procesos perenes sobre la faz de la Tierra; procesos que destruyen y construyen. En la Figura 1 se muestra una sección geológica estudiada por Hutton, en la que distinguió varios periodos de tiempo materializados en unidades de estratos y separados por discontinuidades; éstas, sin representación material. En la sección geológica, las rocas representaban inmensos periodos de tiempo.

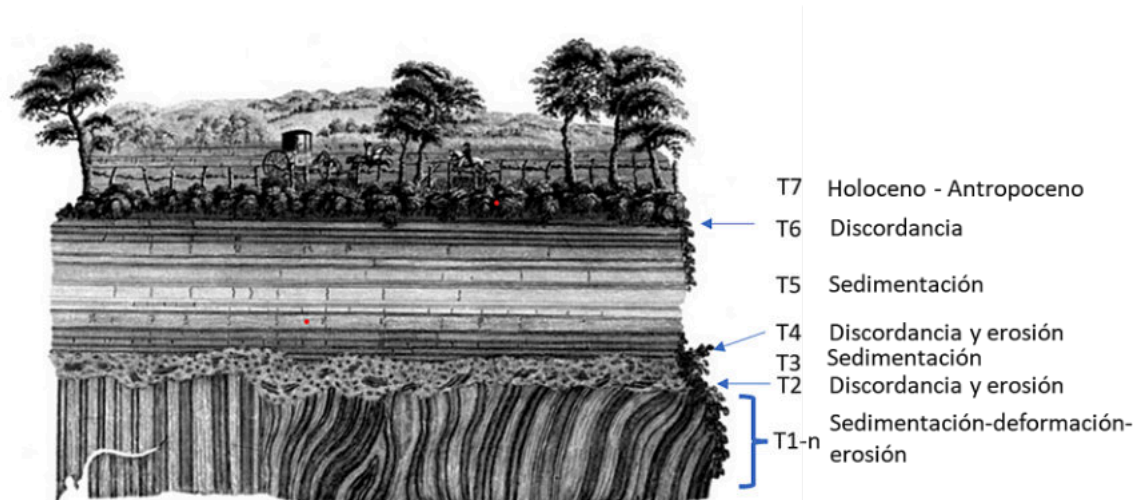


Figura 1.- Famoso grabado elaborado por John Clerk de Eldin, de la discordancia de Jedburgh, Escocia. (Cortesía de sir John Clerk de Penicuik, para la *Theory of the Earth* de Hutton. The Lost Drawings, scottish Academic Press

²⁰ Hutton, J., 1795.- *Theory of the Earth*. In Eicher, D. L., 1973.- El tiempo geológico. Col. Fundamentos de las ciencias de la Tierra. Ediciones Omega, S. A., pp. 5.

Limited, Edimburgo); in Gould, S. J. (2020), *La Flecha del Tiempo*. En la figura, T1 a T7, representan los tiempos geológicos de la serie estratigráfica.

Además, el mérito de Hutton fue haber intuido, discernido, el tiempo inmenso de la historia geológica de la Tierra; los episodios o periodos de tiempo necesarios para explicar e interpretar los procesos geológicos observados en el campo. Asimismo, Lyell y otros pioneros de la Geología como Cuvier y de Beaumont, demostraron racionalmente que la Tierra había experimentado innumerables episodios de transformación de sus relieves y formación de cadenas de montañas durante inmensos periodos o episodios de tiempo geológico.

Estos periodos de tiempo "registrado" en las rocas fueron llamados ciclos del tiempo; los cuales se deben identificar como episodios y periodos de tiempo, mas no como ciclos *sensu stricto*, o sea círculos repetitivos. Así, los diferentes episodios, o periodos, de tiempo de los acontecimientos geológicos son los tiempos relativos; y que, encadenados, conforman la historia geológica de la Tierra. Nicolaus Steno, por ejemplo, pensaba que "la repetición cíclica es una propiedad inherente del tiempo y los procesos naturales."²¹ La historia gira como un conjunto de ciclos sucesivos (ciclos o periodos del tiempo), pero cada "repetición" de ciclos es diferente; esto permite notar la inteligibilidad del tiempo, o sea que el tiempo transcurre, imponiendo así, una dirección a la historia natural (o filosofía de la naturaleza). Se establece así las bases de la Geología histórica anclada en una noción de tiempo ilimitado, y que permitiría explicar los procesos geológicos en sucesiones relativas entre ellos, y como resultado de la dinámica natural de las leyes y fuerzas actuantes en la naturaleza. La Tabla del Tiempo Geológico, o Escala Cronoestratigráfica, es la representación de los episodios de tiempo geológico en diversas regiones fundamentados en "unidades roca". Su encadenamiento vertical materializa la historia de la Tierra o Geología histórica. El gran "ciclo del tiempo geológico", que va del Precámbrico al Holoceno esta subdividido en sub-ciclos en varios niveles escalares; señalando eones, eras, periodos, edades. Este gran ciclo del tiempo geológico mayor, no es el tiempo profundo, lineal, absoluto, eterno. Aquél es porción pequeña de éste.

El estudio del mundo natural (por la Geología), fue el fundamento del entendimiento inicial de las leyes naturales en el contexto temporal, sentando las bases galileanas de las ciencias modernas. Por ello, el tiempo geológico, llegó a ser la entidad infinita de los procesos geológicos, y de la vida, en la historia de la Tierra. Tanto Hutton como Lyell manifestaron que no había "ningún vestigio de un comienzo, ni perspectiva de un fin"²². "El concepto original de Lyell y Hutton consideraba una máquina mundial repitiendo sus ciclos una y otra vez indefinidamente, -una máquina que era, para todos los propósitos prácticos, eterna"²³.

En la obra de Charles Lyell, *Principles of Geology*, se establecen cuatro significados de uniformidad: a.- la uniformidad de leyes; b.- la uniformidad de procesos geológicos (o actualismo); c.- la uniformidad de tasa o gradualismo; y d.- uniformidad de estado o no-progresismo. Esta uniformidad o actualismo en Geología implica que, de acuerdo a la entropía universal, la direccionalidad de los procesos geológicos es real, viene del pasado y va al futuro insondable. Lo mismo se puede asumir en el carácter progresivo de la historia de la vida, en sucesiones y etapas de faunas y floras contemporáneas, no en evolución, (*"Natura non facit*

²¹ Gould, S. J., 2020. *La flecha y el ciclo del tiempo*. Ed. FCE., pp. 95.

²² Eicher, D. L., 1973.- *El tiempo geológico*. Col. Fundamentos de las ciencias de la Tierra. Ediciones Omega, S. A., pp. 8.

²³ Eicher, D. L., *ibidem*, pp. 9.

saltum”, “la naturaleza no da saltos”). El registro fósil muestra una progresión de formas, no de evolución, pues no existen, en general, especies índice que funcionen como “eslabones”. Los ciclos de tiempo o periodos, son etapas repetitivas y uniformes de procesos geológicos materializados en secuencias cronoestratigráficas. Es decir, son unidades tiempo-roca, o cronoestratigráficas alternando con discordancias y hiatus sin registro temporal materializado. El entendimiento de la Tierra, por tanto, de la Geología, necesita comprender: el ciclo del tiempo manifiesto en los procesos o fenómenos geológicos; la noción de la línea del tiempo universal; la inserción del tiempo geológico en el tiempo lineal, universal y eterno.

Esta escala del tiempo geológico, representa dos perspectivas del tiempo. El tiempo “absoluto” y el tiempo relativo. Así, el tiempo “absoluto”, por convención, es el tiempo transcurrido de los diferentes acontecimientos geológicos que se cuantifica en años. Este tiempo mal llamado “absoluto”, en Geología, y cuantificado en millones de años, no es el tiempo universal, verdaderamente absoluto en sentido estricto. Tal cuantificación es medida a partir de los métodos de evaluación de las tasas de semidesintegración radioactiva de isótopos inestables que se encuentran en minerales y rocas de la corteza terrestre Y el tiempo relativo, edad relativa, o datación relativa, es la ubicación en la escala temporal geológica, o en una secuencia de tiempo de los acontecimientos geológicos y de las rocas relacionadas a estos eventos. Estos tiempos geológicos relativos y “absolutos” literalmente significan la edad relativa y “absoluta” de la Tierra.

La edad de la Tierra: La Escala del Tiempo Geológico

Los métodos de datación geológica, relativa y “absoluta”, son complementarios para establecer las edades relativas y “absolutas”, respectivamente, de los acontecimientos geológicos y de sus ciclos o periodos de tiempo en que ocurrieron. Por tanto, la escala del tiempo geológico, o más propiamente, la Tabla Cronoestratigráfica del Tiempo se fundamenta en estos dos métodos de datación, relativa y absoluta. Ambos, correspondiendo al tiempo geológico llamado ciclo o periodo del tiempo geológico (relativo) *sensu stricto*; el cual se inscribe en el tiempo llamado tiempo universal absoluto *sensu stricto*, o flecha del tiempo, profundo e inconmensurable que no es posible medir geológicamente, ni aun astronómica o cosmológicamente. La concepción, aun elemental, de este tiempo, parece escapar completamente a la mente humana.

El entendimiento cabal de la Tierra, es decir, la Geología requiere imperiosamente: a.- comprender el ciclo (o los ciclos) del tiempo manifiesto en los procesos o fenómenos geológicos; b.- discernir o tener la intuición de la línea del tiempo, es decir el tiempo profundo y absoluto; c.- anclar, o referir, adecuadamente el tiempo geológico, o sea el ciclo del tiempo en el tiempo lineal, profundo, eterno.

En cuanto a las edades llamadas “absolutas” medidas por radiometría, fue Arthur Holmes quien realizó, a principio del siglo XX, varias mediciones de edades geológicas de minerales y rocas que contenían elementos radioactivos.²⁴ Los elementos utilizados para medir edades geológicas actualmente son, principalmente, el Uranio 238, Uranio 235, Torio 232, Rubidio 87, Potasio 40 y Carbono 14. Las edades medidas por datación radiométrica se las conoce como edades “absolutas”. Sin embargo, sólo representan edades en un ciclo de tiempo, el cual

²⁴ Eicher, D. L., *Ibidem*, pp. 18.

corresponde a un periodo o evento geológico relativo, y anclado en el seno del tiempo profundo absoluto (*sensu stricto*).

La Escala del tiempo geológico, o cronoestratigráfica (Tabla 1), representa aproximadamente 4,500 a 4,600 millones de años subdivididos en varias unidades cronológicas de tiempo, representadas por unidades de diferentes tallas.

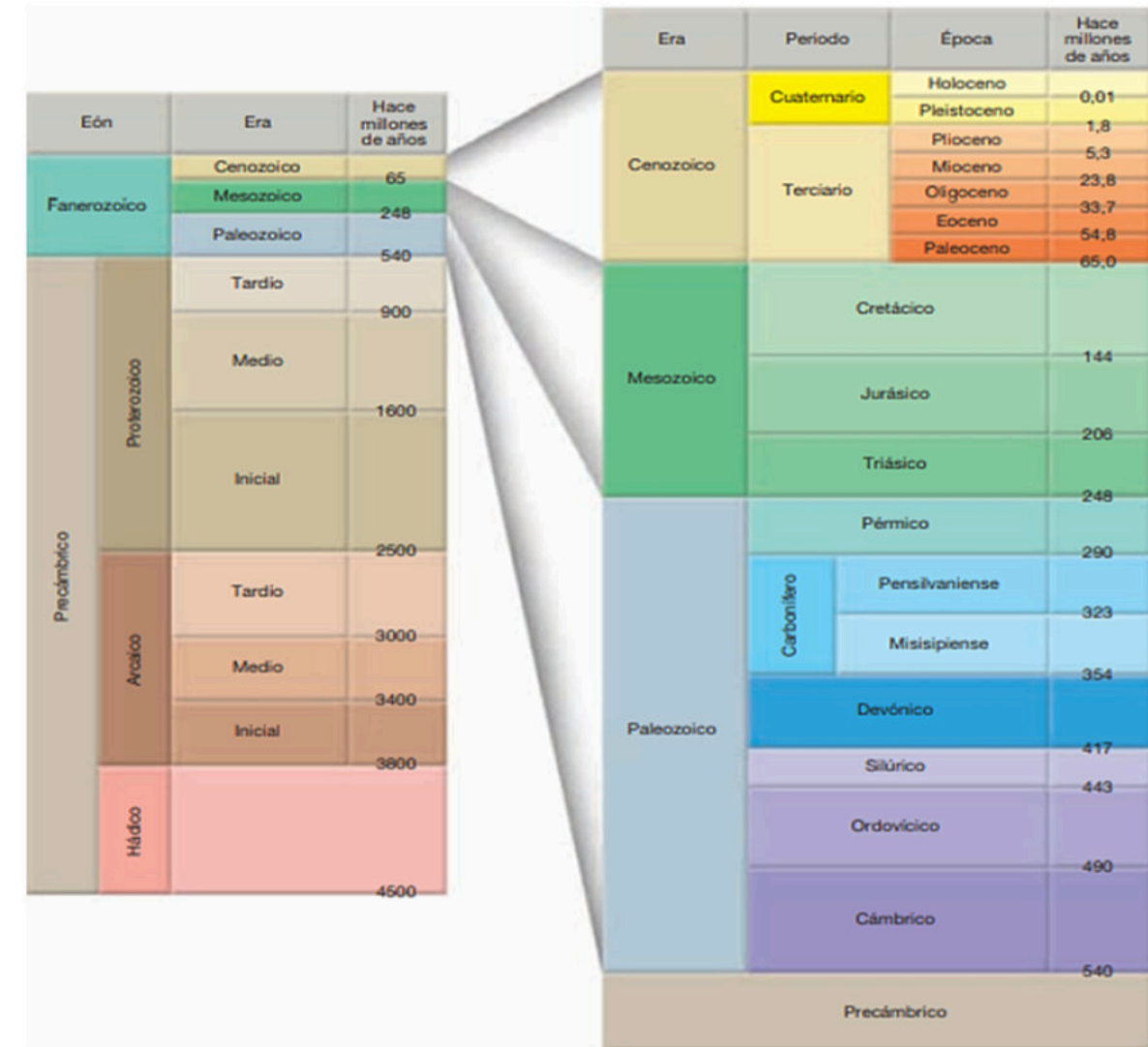


Tabla 1.- Escala del tiempo geológico. Los eones, eras y periodos son los tiempos relativos, establecidos según la datación relativa de unidades roca; las cifras son edades obtenidas por datación de elementos radiactivos. Fuente: *Ciencias de la Tierra*, por Tarbuck, E. J. y F. K. Lutgens, 2005, Ed. Pearson/Prentice-Hall.

Las unidades mayores son los eones, le siguen las eras, luego los periodos, después las épocas y las edades. Los eones son el Precámbrico y el Fanerozoico; las eras del Fanerozoico son el Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico. El Paleozoico se subdivide en siete periodos; el Mesozoico posee tres periodos y Cenozoico tiene tres periodos (cf. Tabla 1, anterior).

Se puede constatar que la escala del tiempo geológico presenta más detalle a partir del periodo Cámbrico, hace unos 541 millones de años, debido a que en este periodo comienzan a

aparecer las primeras formas de vida reconocibles a través de los restos fósiles conservados en las rocas, y que van a ser cada vez más numerosos hasta el Cenozoico. Estos 541 millones de años del Fanerozoico representan sólo cerca del 10% del tiempo geológico hasta ahora cuantificado. Como se observa en la tabla del tiempo geológico, todo el eón Precámbrico representa cerca de 4,000 millones de años sin vestigios apreciables de formas vivientes; y, en tiempo, este eón representa cerca del 90% de la edad de la Tierra; pero hasta ahora muy poco conocida.

En definitiva, al contrario de la noción aristotélica, el tiempo no es un “número”, sólo cuando se lo quiere “medir” y se le impone un número: la Geología impuso números al tiempo, y por ello, el tiempo geológico devino relativo: representa acontecimientos geológicos correlacionables y superpuestos en una escala temporal.

3.2- El Tiempo en la Cosmología

El Tiempo y la relatividad; el nuevo paradigma

En el marco de las ecuaciones de Maxwell, que satisfacen un principio de relatividad especial, para comprender las propiedades reales del mundo que vivimos fue necesaria la aportación de un principio adicional: la concepción como única entidad de un espacio-tiempo tetradimensional, el cual fue aportado por Hermann Minkowsky (1864-1909). Este principio fue enunciado en 1908 por Minkowsky: “En lo sucesivo, el espacio por sí mismo, y el tiempo por sí mismo, están condenados a desvanecerse en meras sombras; y sólo una especie de fusión entre los dos mantendrá una realidad independiente.”²⁵ En la representación del espacio-tiempo (tetradimensional, 3 dimensiones del espacio y 1 dimensión del tiempo) de la Figura 2, siguiente, cada punto de la imagen representa un suceso, es decir un punto en el espacio en un simple momento; un punto que tiene sólo una existencia instantánea. Tal figura representa toda la historia: pasado, presente y futuro. Así, una partícula que persiste en el tiempo, está representada por la línea, aquí denominada como *línea-de-universo*. Esta *línea-de-universo* puede ser recta o curva (si la partícula se mueve uniformemente, o y si se acelera, es decir, si se mueve no uniformemente, respectivamente), describe toda la historia de la existencia de la partícula²⁶.

La visión del espacio-tiempo de Minkowski procede de la física experimental, es decir, de la realidad material. Para la física clásica, galileana-newtoniana, Einstein estableció que la representación gráfica del movimiento de una partícula se puede visualizar de dos formas: como una imagen dinámica del movimiento y como una imagen estática. En el primer caso sería una serie de sucesos, en un continuo unidimensional, en el espacio-tiempo, en el cual las posiciones de una partícula se visualizan en el paso del tiempo; la segunda, se puede representar el movimiento en una trayectoria curva en el continuo bidimensional espacio-tiempo (cf. Figura 2).

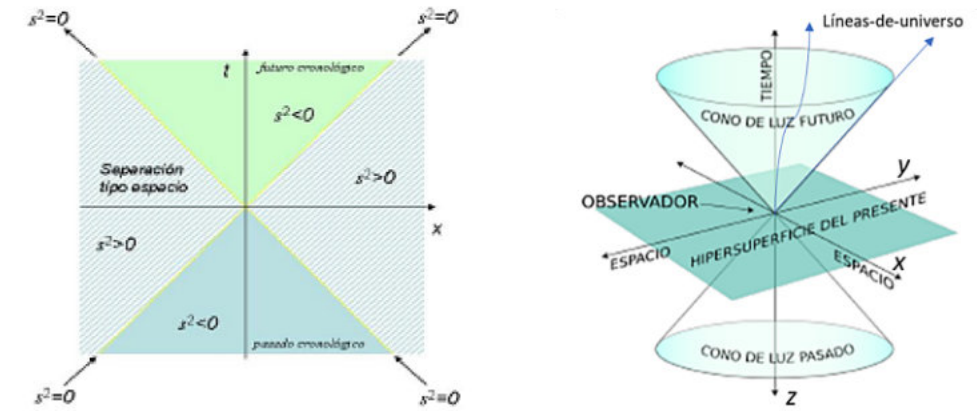


Figura 2. - Espacio bidimensional y tetradimensional de Minkowski (2 dimensiones en el primero (espacio en x e y tiempo), y 3 dimensiones espaciales y una temporal, en la segunda figura), in Ortiz, 2016.

En la relatividad el tiempo es distinto para cada observador y sistema de referencia (de coordenadas) en el espacio-tiempo, como una sola identidad. Por ello, en relatividad, los fenómenos se representan en un espacio-tiempo tetradimensional, o espacio de Minkowski; donde una partícula o un fotón (que cambia de coordenadas) y se desplaza en el espacio-tiempo, como un suceso desarrollado en un *cono de luz invariante*, o fenómeno causa-efecto.²⁷

En este espacio-tiempo de Minkowski, un suceso visto por diferentes observadores en sistemas de referencia distintos. “El mundo de los sucesos es un continuo de cuatro dimensiones.”²⁸ El espacio y el tiempo son variables al pasar de un sistema de coordenadas a otro; empero, el intervalo espacio-temporal no varía de un sistema de coordenadas a otro, pero si existe variación entre los tiempos de los acontecimientos (o sea, hay relatividad de la simultaneidad) y existe variación en la distancia longitudinal entre ellos (relatividad de la longitud). Estas representaciones son factibles en el espacio de Minkowski. La línea vertical en este diagrama de Minkowski es la *línea-de-universo* o eje del tiempo *t* en el sistema de referencia *s*.

En la Figura 2, de la derecha, el pasado y el futuro de una partícula, o fotón, en O (origen u observador), cuya *línea-de-universo* es *t*, constituyen el *cono de luz* de O. Cualquier acontecimiento ocurrido dentro del cono de O tiene con respecto a O, una separación temporal según la cual en algún sistema alternativo S', ambos acontecimientos suceden en el mismo lugar, pero no en el mismo tiempo. Además, no hay ningún sistema alternativo S' en el cual sean simultáneos. El tiempo es, entonces, un conjunto de acontecimientos que se suceden en un mismo punto, y el espacio es el conjunto de los acontecimientos simultáneos.²⁹ Así, una *línea-universo* de una partícula o fotón persistentes en el espacio-tiempo; es un proceso que existe en sucesivos momentos; una historia que une las distintas posiciones en el espacio y en el tiempo, unidos en la entidad matemática-filosófica única espacio-tiempo.

²⁵ Penrose, R., 1989.- *The Emperor's New Mind*. Oxford University Press. *La Nueva Mente del Emperador*. Edición en español de 1991, por Grijalbo Mondadori. Barcelona, España. pp. 250.

²⁶ Penrose, R., *Ibidem*, pp. 251.

²⁷ Ortiz, G. J., 2016.- *Los Elementos del Concepto de Tiempo Aristotélico en la Teoría de la Relatividad*. Tesis doctoral. Universitat Abat Oliba CEU, Facultad de ciencias Sociales., pp. 246.

²⁸ Einstein, A., 1969.- *La física: Aventura del pensamiento*. Buenos Aires: Editorial Losada S. A., in Ortiz, G. J., *Ibidem*, pp.247.

²⁹ Ortiz G. J., *Ibidem*, pp. 248.

En la imagen del espacio-tiempo de Minkowsky, la *línea-de-universo* de un fotón está representada como una línea recta inclinada a 45° de la vertical.³⁰ En la Figura 2, la magnitud de la coordenada *t* (TIEMPO) no describe el tiempo medido por un cronómetro preciso, salvo si está en reposo en el sistema de coordenadas con valores fijos de *x*, *y*, *z*, lo cual implica que el cronómetro tendría una *línea-de-universo* vertical en el diagrama³¹. Por ello, *t* (TIEMPO) es el tiempo para observadores en reposo con *líneas-de-universo* verticales. Para un observador en movimiento, la medición correcta estará sobre una línea diferente de la línea *t*, o TIEMPO, de la figura anterior.

Establecido lo anterior, “las invariantes geométricas del mapa universal de Minkowski no son, por tanto, más que la representación gráfica de relaciones también invariantes entre distancias, tiempos, velocidades, aceleraciones, fuerzas, masas, impulsos y energías de los puntos perceptibles, los cuales constituyen las leyes físicas absolutas de un Universo único que no depende de quién lo percibe.”³²

En un campo gravitatorio de mayor intensidad, el tiempo transcurre más lentamente. Las propiedades geométricas del espacio-tiempo están condicionadas por la materia. Una definición del tiempo en Física, según Einstein es: “el tiempo de un evento es la indicación de un cronómetro inmediatamente vecino al evento.”³³ Por tanto, la concepción del tiempo según la relatividad general, concibe que el tiempo transcurre de manera diferencial para diferentes campos gravitatorios; a mayor curvatura del espacio-tiempo, el tiempo medido pasa más lentamente, es decir, ocurre la dilatación temporal del tiempo. La concepción del tiempo basada en la relatividad general, es completamente diferente a la concepción profunda “lineal” del tiempo humano. Según la teoría de la relatividad, la materia-energía determina las propiedades geométricas y gravitacionales del espacio-tiempo. Y en sí, se trata ya de un espacio-tiempo crono-geométrico. Así, todo cuerpo masivo situado en una curvatura del espacio-tiempo se desplaza con un movimiento acelerado determinado por tal curvatura³⁴.

El tiempo, en la relatividad general, ya no es homogéneo ni uniforme, porque es intrínseco al espacio, a la materia-energía; los cuales son heterogéneos y dinámicos. También son relativas las mediciones del tiempo, ya que están subordinadas a los distintos campos gravitatorios. En la naturaleza ya no existen series temporales únicas; ni transcurre el tiempo con ritmos uniformes. Aunque, sin embargo, sí son posibles las relaciones de contemporaneidad entre distintas *líneas-de-universo* (cf. Minkowsky); y esta relación de contemporaneidad constituye la esencia fundamental del espacio-tiempo relativista. El tiempo relativista es sólo uno, en sentido topológico. De esta manera, la noción de simultaneidad, de la mecánica clásica, es sustituida por la de contemporaneidad del tiempo relativista³⁵.

Según la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$, “la energía posee masa y la masa representa energía. En lugar de dos principios de conservación se tiene uno sólo: el de la conservación de

³⁰ Penrose, R., 1989.- *The Emperor's New Mind*. Oxford University Press. *La Nueva Mente del Emperador*. Edición en español de 1991, por Grijalbo Mondadori. Barcelona, España., pp. 251-252.

³¹ Penrose, R., *Ibidem*, pp. 254.

³² Sommer, H., 1979.- *Relatividad sin enigmas. Un enfoque racional*. Editorial Herder, pp.185, in Ortiz G. J., *Ibidem*, pp. 246.

³³ Einstein, A., 1956.- *La Relativité*. Petite Bibliothèque Payot, Éditions Gauthier-Villars, pp. 32-33.

³⁴ Ortiz G. J., *Ibidem*, pp. 234.

³⁵ Ortiz G. J., *Ibidem*, pp. 237.

la masa-energía.”³⁶ Según la ecuación de Einstein, “cuanto más se acerque la velocidad de un cuerpo a la velocidad de la luz, tanto más difícil será aumentarla... Todo aumento ulterior resulta imposible. Esta modificación introducida por la teoría de la relatividad no nos puede sorprender, ya que la velocidad de la luz es un límite insuperable para todas las velocidades. Ninguna fuerza finita, por grande que sea, puede causar un incremento de velocidad más allá de dicho límite. En lugar de la ley de la mecánica clásica que relaciona la fuerza con el cambio de velocidad aparece, en la relatividad, una ley más complicada.”³⁷

Siendo que la relatividad especial niega la simultaneidad absoluta, la relatividad general negará la instantaneidad, en el marco del dinamismo que caracteriza al Universo en expansión y en permanente transformación, en un espacio-tiempo curvo, representado por la geometría no euclidiana de Riemann. En el Universo espacio-temporal de la relatividad general no existe la instantaneidad, tampoco existirá la simultaneidad absoluta. Así, la teoría de la relatividad general ha venido a reforzar la negación de la simultaneidad absoluta que implicó la teoría de la relatividad especial.³⁸

En resumen, en la teoría de la relatividad, matemáticamente, la concepción del tiempo es una “coordenada” en el espacio tridimensional. Así, existirían cuatro coordenadas en el espacio-tiempo (que en realidad serían sistemas de referencia). Esta geometría tetradimensional constituye la noción del espacio-tiempo en cuatro dimensiones donde ocurren los acontecimientos de la realidad universal multiescalar, así como los fenómenos conceptuales y experimentales de la curvatura del espacio-tiempo y la *dilatación del tiempo*. Ahora el tiempo es una propiedad geométrica, siendo la distancia entre dos sucesos, según su velocidad relativa. El espacio le “dice” a la materia cómo debe moverse, y la materia le “dice” al espacio cómo debe curvarse (John Wheeler). Esto es, *grosso modo*, el tratamiento del espacio-tiempo en física teórica y experimental. Y a estas nociones se suma la *función de universo* y el *espacio de Hilbert* conformado por tensores, para explicar la presencia de la gravedad en la geometría del espacio-tiempo. Estos conceptos de Hilbert han permitido la construcción de una nueva visión cosmológica del Universo.

De la expansión del Universo se concibe la flecha del tiempo geométrica universal. Por tanto, los semiconos de Minkowski en dirección de la expansión son los futuros, donde se contiene la coordenada *t*, o flecha del tiempo universal; esta sería la flecha cosmológica del tiempo y debida la entropía que aumenta en dirección al futuro. El tiempo universal no tiene reversibilidad; el tiempo geológico y el humano, tampoco. El inicio del tiempo universal es $t = 0$; y desde luego también el inicio del espacio-tiempo y de la materia. Empero, la incertidumbre es, todavía el tiempo; ya que el universo, según los diferentes modelos, puede ser cerrado, abierto o plano. Es decir, finalmente conocer cuándo y cómo, y cuánto es el tiempo, no es posible saberlo. Como este universo evolucionó, o evolucione, dependerá de la constante cosmológica, la cual es incierta conocer y cuantificar precisamente. También, se reconoce que el universo tiene una historia térmica (y la Tierra la tendría también). En resumen, según sea la evolución del Universo, para lo cual hay variados modelos, serán las características espaciales (o topológicas) del tiempo universal. Entonces, un *punto-instante* en el espacio-tiempo universal será un *aquí-ahora*, o un *hic et nunc*, único e irreplicable en toda la *eternidad-espacio*. El

³⁶ Einstein, A., 1969.- *La física: Aventura del pensamiento*. Buenos Aires: Editorial Losada S. A., in Ortiz, G. J., *Ibidem*, pp.171.

³⁷ Einstein, A., *Ibidem*, in Ortiz, G. J., *Ibidem*, pp.168-169.

³⁸ Ortiz G. J., *Ibidem*, pp. 244.

presente es un *prae-esse*, (en latín *prae*: delante, frente. Y *esse*: ser, existir, infinitivo de *sum*; soy existo). Un *Ἐγώ εἰμί*, (*Ego eimi*), “yo soy”, “yo existo”, en un *punto-instante* del Universo.

Y la luz, unida al espacio-tiempo, es *lux aeterna* (luz eterna) que viaja en el espacio-tiempo, y es tiempo también; pero los cuales no se comprenden aun en su naturaleza y profundidad. Y el tiempo universal (tiempo absoluto o flecha del tiempo universal entrópica), desde el inicio del espacio-tiempo hasta ahora, es espacio-tiempo-energía, desplegado en el fluir de instantes *ad infinitum*. El Universo posee una historia (tiempo transcurrido), por ello es asimétrico y posee dirección y sentido. Y, en dirección de la “flecha temporal”, la ley de la entropía lo hace irreversible, del pasado al futuro; al menos por ahora. Igualmente, la historia de la Tierra posee una flecha del tiempo que es irreversible. Al menos existen, por tanto, tres flechas de tiempo: la flecha termodinámica, del incremento de la entropía; la flecha psicológica de la consciencia (pasado, presente y futuro que experimenta el ser humano); y la flecha cosmológica, que refleja la expansión del Universo. Las tres flechas del tiempo tienen el mismo sentido.

Aproximación a la Edad del Universo

La base material para tratar de “medir” el tiempo es la materia del Universo, aunque a partir de aproximaciones y medios indirectos. Las apreciaciones de la edad del Universo, desde el *Big Bang* hasta la actualidad, se fundamenta en modelos que se basan, a su vez, en los siguientes hechos o teorías cosmológicas:

a.- La Teoría de la expansión del Universo (efecto Doppler-Fizeau de la luz creando sus trazas espectrales desplazadas hacia altas longitudes de onda al alejarse). El corrimiento al rojo z se define como: $z = \Delta\lambda/\lambda$. En estas condiciones, la velocidad de alejamiento llega a ser: $V = cz$, donde c es la velocidad de la luz; y donde V es válida para velocidades menores a la de la luz.

b.- La singularidad, es decir, en el pasado las galaxias estaban muy próximas, en un Universo muy pequeño, muy denso y muy caliente. Según la relatividad general el universo tenía dimensión nula y densidad y temperatura infinitas. Este aspecto es sólo matemático, porque la física actual es incapaz de describir los fenómenos junto a este punto llamado singularidad.

c.- El Factor de escala es $z + 1 = R_0/R_e$; donde: R_0 es al factor de escala actual; y $R(t)$ el del tiempo t ; R_e es el factor de la emisión de la luz estudiada. Si $z = 1$, entonces $R_0/R_e = 2$.

d.- Las constantes libres del modelo estándar; este modelo es un modelo del Universo obtenido a partir de las ecuaciones de Einstein, según diversas hipótesis simplificadas o pruebas: la radiación cosmológica de fondo; la expansión del Universo; y su composición química. Este modelo estándar funciona basado en tres constantes libres no calculadas, sino determinadas por observación: la constante de Hubble H_0 , la constante cosmológica Λ , y la densidad del Universo Ω_0 . La constante de Hubble es la representación de la edad del Universo, ya que representa la relación entre la velocidad de escape de las galaxias y su distancia.

Por otra parte, la constante cosmológica Λ , introducida por Albert Einstein, existiría, si la velocidad de expansión del Universo se acrecienta, la cual estaría produciendo la repulsión de la materia; por tanto, sería contraria a la gravitación de la misma. La constante cosmológica Λ tiene especial importancia en la transformación tiempo de Hubble y la edad del Universo. Y la

densidad del Universo Ω_0 se relaciona con el factor de escala, y define la cantidad de materia para que el Universo continúe en expansión, y sea estático o se contraiga.

Así, con base en los argumentos teóricos precedentemente expuestos, de manera breve, se puede evaluar la edad del Universo según determinado modelo cosmológico, entre todos los posibles. La evaluación de la edad es dependiente de las hipótesis que se adopten: Universo vacío (Einstein), de densidad nula, o si está en expansión (según varios modelos de Friedman); las estimaciones de las velocidades cosmológicas; la determinación de distancias por la utilización de luminosidades absolutas estándar de fuentes estelares (*v. gr.* cefeidas); la luminosidad de galaxias (relación Tully-Fisher); supernovas, así como las estimaciones de la velocidad y la constante de Hubble H_0 obtenidas de manera observacional sobre galaxias y supernovas.

Una aproximación a la edad del universo, por ejemplo, puede ser calculada a partir de H_0 , Ω_0 y Λ_0 . Así, la estimación actual de la edad del Universo (Planck y WMAP) sería: $\sim 13.8 \times 10^9$ años. Donde: H_0 es la constante de Hubble; Λ es la constante cosmológica de Einstein; y Ω_0 es la densidad del universo. Los valores asignados a estos parámetros, se exponen en la siguiente tabla (*cf.* Edwin Hubble).

H_0 Cte de Hubble	Ω_{m0}	$\Omega_{\Lambda 0}$	Edad (10^9 años)
72	1.0	0.0	9.0
72	0.3	0.0	11.0
72	0.3	0.7	13.1
60	1.0	0.0	10.9
60	0.3	0.0	13.2
60	0.3	0.7	15.7

La edad de las estrellas más antiguas de nuestra galaxia (cúmulos globulares) es estimada en ~ 13 mil millones de años. Es decir, todo modelo cosmológico que predice la edad del Universo menor a 13×10^9 años está en conflicto con los modelos de evolución estelar; esto es justamente para el nuevo modelo estándar ($H_0 = 68$; $\Omega_0 = 0.31$; $\Lambda_0 = 0.69$). El modelo estándar es el llamado Universo del “*Big Bang* caliente”; y el cual se fundamenta en tres pilares de observación: la expansión del Universo (escape de galaxias); la radiación cosmológica fósil de fondo de $T = 3 \text{ K}^\circ$ (ó 2.725 K°); y la abundancia de los primeros elementos de la tabla periódica de Mendeleiev (Hidrógeno y Helio). Que a su vez se apoyan en una teoría: la Relatividad General; y en un Principio cosmológico: un Universo homogéneo e isótropo.

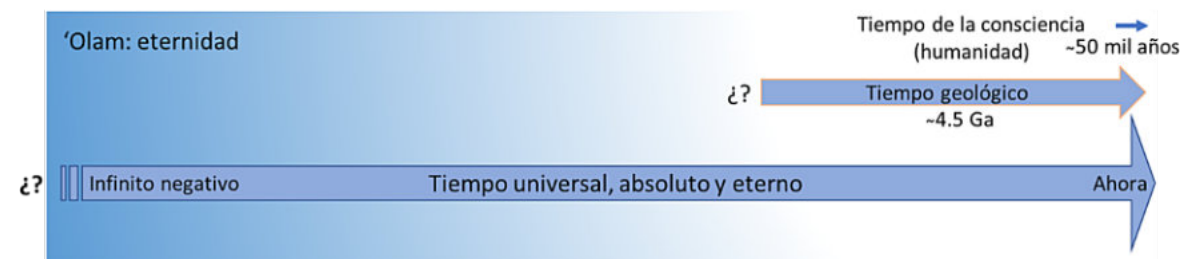


Figura 3.- Comparación “escalar” temporal del tiempo. El tiempo geológico sólo es una parte ínfima del tiempo universal; el tiempo humano es casi nada.

Finalmente, la edad del Universo, con todas las incertidumbres existentes como, la determinación de H_0 (errores en las apreciaciones de velocidades cosmológicas y distancias de

evaluación de Ω_0 , que varían enormemente entre 0.2 y 20), y los errores en la evaluación de la constante cosmológica (si es que existe), representa sólo una aproximación conjetural e imprecisa. Existen diversas incertidumbres sobre varios parámetros. Empero, las ideas existentes sobre la edad del Universo, en general, cuentan con el consenso de la mayoría de los cosmólogos. Así, de manera general, la Figura 3 muestra las relaciones cualitativas entre las tres nociones del tiempo: el tiempo universal, el tiempo geológico y el tiempo humano.

Por tanto, actualmente con base en el valor posible de $H_0 = 57 \pm 5 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$; en el marco del modelo estándar de Einstein-Sitter, la edad del Universo podría ser $t_0 = \sim 11.4 \pm 1$ mil millones de años. Aunque, por otra parte, según mediciones procedentes de Hipparcos proveen una edad, para los conjuntos globulares de galaxias, de 15 ± 3 mil millones de años. Esto no es concordante: que los objetos del Universo sean más antiguos que la propia edad del Universo. En las estimaciones de la edad del Universo, se espera que en el futuro se pueda mejorar la precisión de las medidas; y al parecer, las incertidumbres también proceden de la elección de los variados modelos cosmológicos sobre los que se desea fundamentar la estimación de la edad del Universo³⁹.

4.- EPÍLOGO CONCLUSIVO

En suma, la revolución intelectual sobre la edad de la Tierra fue obra de los geólogos, particularmente durante el siglo XVIII y XIX, que descubrieron que la Tierra y la vida en ella tenía una larga historia. Asimismo, la cosmología del siglo XX, con la teoría de la relatividad general y los descubrimientos astronómicos demostraron que el Universo también posee una infinita historia.

Las relaciones de tiempo, como reconocimientos en la consciencia, sólo son posibles desde lo que es permanente (caracterizado por relaciones de simultaneidad, de contemporaneidad, de sucesión), es decir, lo permanente es el substrato de la representación del tiempo. La determinación temporal es posible sólo en este substrato, que es la materialización de la existencia y la acción de los fenómenos físicos que han ocurrido en el mundo-cosmos. Este proceso de conocimiento (epistemológico) fue la esencia del reconocimiento del tiempo geológico, o de los periodos de tiempo geológico materializados en las rocas sedimentarias, el cual fue realizado por Hutton; ya que él reconoció objetos “permanentes” o “substratos” (rocas) en relaciones de simultaneidad, contemporaneidad, sucesión (o correlación estratigráfica). Esta fue la clave esencial del descubrimiento del tiempo objetivo (caracterizado por la persistencia) registrado en Geología, e inserto en el tiempo absoluto, universal (el tiempo infinito), que constituyó una revolución intelectual en el conocimiento humano sobre el mundo.

En el espacio-tiempo no hay simultaneidad absoluta, no hay “secciones transversales” que contengan todos los sucesos verdaderamente simultáneos⁴⁰. Análogamente, en estratigrafía (sedimentología) no hay espacio-tiempos simultáneos o sedimentación simultánea correlacionable absolutamente en tiempo geológico, porque los acontecimientos geológicos ocurren en una superficie de tipo espacio-tiempo sobre la superficie de la Tierra. Y cada punto en esa superficie tipo espacio-tiempo (medio sedimentario), no habrá los mismos eventos

³⁹ Maratrey, J. P., 1999.- *L'age de l'universe*. Quasar 95, Club d'Astronomie de Valmondois. 12 p.

⁴⁰ Ortiz G. J., *Ibidem*, pp. 237.

sedimentarios simultáneos ni uniformistas (es decir, cada punto en esa superficie-tipo habrá infinidad de conos de luz (eventos) en el espacio de Minkowsky⁴¹). El pasado de la Tierra está registrado en las rocas y sus estructuras, las cuales son su memoria. En el mundo geológico hay tiempo pasado materializado en el registro de las rocas sedimentarias. El presente es la acción de los fenómenos geológicos; y el futuro de la Tierra todavía no existe. La Tierra y el Universo constituyen un problema científico y filosófico de infinitas consecuencias. El espacio-tiempo, y la materia-energía contenida en él, ha existido de menos infinito a más infinito $(-\infty, \infty)$; mucho después, muy tarde, llegó el hombre y su consciencia a experimentar el mundo. Aun sin la existencia del ser humano, el espacio-tiempo, y el tiempo universal y absoluto, han existido y existirán *aeternaliter* (eternamente). Si el hombre (su consciencia) se situara en el espacio sideral (universo), ya no habría para él cuenta del tiempo (en días, meses años...), pero la profundidad del tiempo, siempre existiría. El tiempo es absoluto y universal, nuestra consciencia se pierde en él.

Sensu stricto, el tiempo no puede ser definido, puesto que cualquier concepto que se utilice para ello, será un “concepto” que presupone el tiempo. Por tanto, el tiempo no es un concepto, permanece como una intuición. No es el tiempo el que pasa, sino la existencia de lo transitorio lo que sucede o pasa en él; el tiempo no cambia, sólo su contenido (cf. Ortiz, 2016.)⁴² Y pensando en el espacio-tiempo, universal, éste es inmutable, absoluto e infinito; y lo que cambia en el espacio-tiempo es su contenido: la materia, la energía, los fenómenos.

“Porque el tiempo sólo pasa: huye, es inaprensible, escapa al análisis y al pensamiento, y siempre perdura. ¿Cómo no habría de existir si resiste todo y nada le resiste? ¿Cómo no habría de existir, si contiene todo lo que existe? Ser, es ser en el tiempo; así, el tiempo precisa ser. Contiene todo, envuelve todo, devora todo: todo lo que ocurre, ocurre en el tiempo y nada, sin él, podría ser ni devenir. Es, exactamente, la condición de lo real.”⁴³ Este mundo es el único que la consciencia “conoce”, o al cual tiene acceso. “No hay un dominio en que lo *absurdo* y el *misterio* estén más próximos, más íntimamente ligados, que en la experiencia de ese flujo que nosotros creemos conocer, en el que discurre y se mide nuestra vida, y que llamamos simplemente: *tiempo*. Todos aquellos que, desde Platón hasta Heidegger, se han ocupado de la definición del tiempo han vuelto a encontrar las mismas dificultades.”⁴⁴

En la Física, y la ciencia en general, el tiempo es la base de los fenómenos representados en las ecuaciones matemáticas. Las ecuaciones son simétricas respecto al tiempo (cf. las ecuaciones de Newton, Hamilton, Maxwell, Dirac, Schrödinger, Einstein...). En ellas, el tiempo es reversible, puede ir hacia “atrás” o hacia el “devenir”. Pero la irreversibilidad ontológica es la realidad del cosmos, del espacio-tiempo donde nuestro ser existe. En la realidad el “tiempo matemático” no tiene significación ontológica. *Ergo*: “no podemos meternos dos veces en el mismo río”, permanece válido el *dictum* de Heráclito.

⁴¹ Penrose, R., *Ibidem*, pp. 277.

⁴² Ortiz G. J., *Ibidem*, pp. 156-160.

⁴³ Comte-Sponville, A., 2001.- *¿Qué es el tiempo? Reflexiones sobre el presente, el pasado y el futuro*. Editorial Andrés Bello. Traducción de Pierre Jacomet. Título de la edición original: *L'être-temps*, Ed. Presses Universitaires de France., pp.25.

⁴⁴ Guittou, J., 1991.- *Lo absurdo y el misterio*. EDICEP. Primera edición en francés en Desclée de Brouwer, en 1984, con el título: *L'absurde et le mystère*.

En fin, perviven varios conceptos o nociones del tiempo: el tiempo relativo de la Geología; los relojes biológicos; el tiempo tetradimensional de la física y Minkowski; el tiempo de la relatividad general de Einstein; el tiempo histórico humano; el tiempo de la consciencia; el tiempo en cosmología; el tiempo de la creación y el tiempo del fin en la enseñanza cristiana; el tiempo en filosofía; el tiempo de las horas de las tardes apacibles...etcétera. Finalmente, el tiempo no es más que una ilusión, *dixit* Einstein, para nuestra consciencia, pero es el reflejo de una entidad real sobre la cual reposa, y es, todo lo que existe en el maravilloso Universo; y en el cual hemos sido puestos.

"La gente como nosotros, quienes creen en la física, sabe que la distinción entre el pasado, el presente y el futuro, es sólo una ilusión obstinadamente persistente." Son las sabias palabras de Alberto Einstein dirigidas en una carta escrita al hijo y la hermana de Michele Angelo Besso, el 21 de marzo de 1955. ¡Ah, enigma inconmensurable!

Ahora, al instante, este brevísimo y metafórico texto ha terminado, a causa del incremento de la entropía y porque el espacio-tiempo ha llegado a su fin.

Arte poética

Mirar el río hecho de tiempo y agua
y recordar que el tiempo es otro río
saber que nos perdemos como el río
y que los rostros pasan como el agua.

Arte poética, fragmento,
Jorge Luis Borges.

Salvador Ortuño Arzate, Semblanza sucinta



Actualmente es Comisionado de la Comisión Nacional de Hidrocarburos de México.

Profesor titular en la Escuela Militar de Ingenieros de la Rectoría del Ejército y la Fuerza Aérea; y en la Facultad de Ingeniería de la UNAM; en asignaturas de Ciencias de la Tierra; Consultor independiente en temas de Geología y exploración petrolera.

Ha sido investigador en el Instituto Mexicano del Petróleo por más de veinticinco años; y en el *Institut Français du Pétrole*, desempeñándose como investigador huésped ("*Visiteur scientifique*"), para el desarrollo de proyectos de investigación y uso de nuevas tecnologías de modelado geológico, caracterización de sistemas petroleros, métodos de exploración petrolera, yacimientos naturalmente fracturados y teledetección aeroespacial aplicada a la exploración de recursos petroleros.

Asimismo, ha publicado libros y artículos técnicos, v. gr. "*El Mundo del Petróleo*". FCE, 2009; "*La seguridad energética como elemento de la seguridad nacional*", "*Perspectivas petroleras de México*"; "*¿Cuándo se agotará el petróleo?*"; "*Campos maduros, retos difíciles*"; y "*Chicontepec: dislate técnico y político*".

Ejerce la pintura al óleo, como reflejo de la maravilla estética de la naturaleza y la Geología del planeta.

<https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Salvador-Ortuno-Arzate-74472572>

Foro de discusión Discussion Forum

A sugerencia de uno de nuestros lectores, estaremos incluyendo las opiniones y discusiones de nuestros lectores en relación a las Notas Geológicas publicadas, lo que permitirá la participación activa de los interesados. En definitiva, este foro de discusión será de gran valor para mantener el interés en una gran variedad de temas geológicos, y creará un ambiente de colaboración cordial entre nuestras comunidades de Geociencias.

Por favor envíen sus observaciones, comentarios y sugerencias a cualquiera de los Editores de la Revista Maya de Geociencias.

At the suggestion of one of our readers, beginning with this August issue we will be including opinions and discussions from our readers relating to the published geological notes. This will permit active participation by interested parties. This discussion forum will certainly have great value for maintaining interest in a wide variety of geological themes, and will create a cordial, collaborative atmosphere among our geoscience community.

Please send your observations, comments and suggestions to any of the Editors of the Revista Maya de Geosciencias.

COMO PARTE DE LAS ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN DE NUESTRA REVISTA DE GEOCIENCIAS, TENEMOS UNA RELACIÓN DE BUENA FE Y AMISTAD CON LAS ESCUELAS, SOCIEDADES Y ASOCIACIONES GEOLÓGICAS EN OTROS PAÍSES DEL MUNDO.

Instituto Nacional de Geoquímica (México). <https://www.inageq.com/>



Sociedad Venezolana de Historia de las Geociencias.
SVHGc@yahoo.com



Universidad Tecnológica de la Habana, - <https://cujae.edu.cu/>

Escuela de Geofísica: <https://t.me/ConoceGeofisicaCujae.edu.cu/>



Geología Médica

<http://www.medgeomx.com/>



Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo

<https://aggep.org/>



Sociedad Geológica de España

<https://sociedadgeologica.org/>



Sociedad Cubana de Geología

<http://www.scg.cu/>



GeoLatinas

<https://geolatinas.org/>



Sociedad Dominicana de Geología

<http://sodogeo.org/>



Universidad Tecnológica del Cibao Oriental, República Dominicana

<https://uteco.edu.do/>



<http://cbth.uh.edu/>



Piezade Mayapán, Yucatán. INAH. MUSEO REGIONAL DE ANTROPOLOGÍA

¿QUIERES COLABORAR CON NOSOTROS?

ENVÍANOS UN CORREO A:

luis.valencia.11@outlook.com; bernardo.garcia@ingenieria.unam.edu