

DICIEMBRE
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: Flute casts, a type of Sole mark, from the Austin Glen Member of the Normanskill Formation (Ordovician) in the Hudson Valley, New York. These are geological features, locally called 'dinosaur skin,' formed during the Taconic Orogeny found on the base of a stratum, when currents or other forces erode the top surface of the underlying soft sediment. These depressions are then filled in by the overlying coarser sediment, and when the mud layer is eroded away, the preserved filling, or "cast," remains as a sole mark. Common types include flute casts and tool marks, which can provide valuable information about paleocurrent direction and "way-up" for geologists. Here current flows from lower left to upper right. Photo by **Dr. Howard R. Feldman.**

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 Ángel Valencia Flores (M.C.). Ingeniero Geólogo y Maestro en Ciencias en Geología, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura-Unidad Ticomán, Ciencias de la Tierra, del Instituto Politécnico Nacional. Cuenta con 25 años de experiencia. Ha trabajado en el Instituto Mexicano del Petróleo, Petróleos Mexicanos, Schlumberger, Paradigm Geophysical, Comisión Nacional de Hidrocarburos, Aspect Energy Holdings LLC, Facultad de Ingeniería de la

UNAM, actualmente es académico del Instituto Politécnico Nacional (posgrado y licenciatura) donde imparte asignaturas especializadas en la caracterización de yacimientos petroleros. Es estudiante del Doctorado en Energía en el IPN, especializándose en la exploración de Hidrógeno Natural y fuentes alternas de energías.

luis.valencia.11@outlook.com
lvalenciaf@ipn.mx



Bernardo I. García-Amador es Investigador Asociado "C" de Tiempo Completo del Instituto de Geofísica de la UNAM. En 2024 obtuvo su doctorado en Ciencias de la Tierra por la UNAM. Su línea de investigación versa en la aplicación del Paleomagnetismo, Magnetismo de Rocas y Anisotropía Magnética para resolver problemas en Tectónica, Geología Estructural, Vulcanología, y el

Análisis de Cuencas Sedimentarias; siendo autor y coautor de diversas publicaciones científicas. Además, desde el 2018 ha impartido el curso de Tectónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, un tema que le apasiona en las geociencias.

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

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



Ramón López Jiménez (Ph.D.) 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

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



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



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 Tenreyro 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.

tenreyro2015@gmail.com



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.

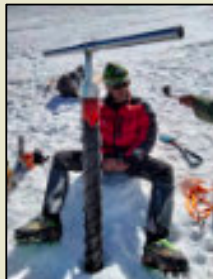
gleon.laura@gmail.com



Rodolfo Rafael Avalos Alejandro 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,

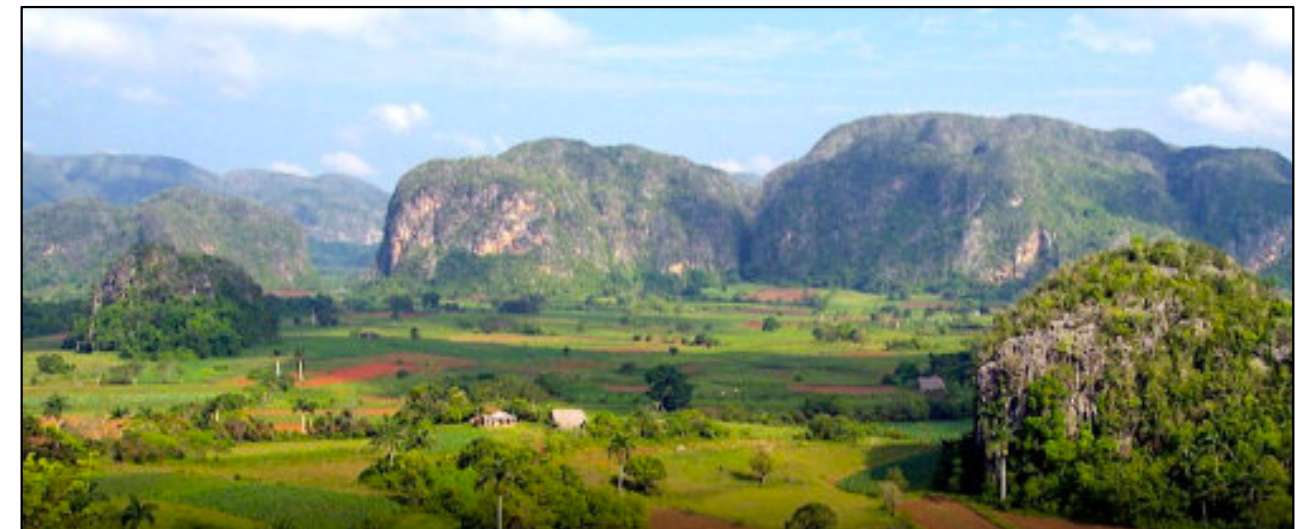
Te invitamos a que visites la página web de nuestra Revista Maya de Geociencias, donde podrán encontrar (en formato PDF), todas las revistas que hemos publicado hasta ahora, mismas que pueden descargar de la página. También estaremos incluyendo información adicional que sea de utilidad para nuestras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



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

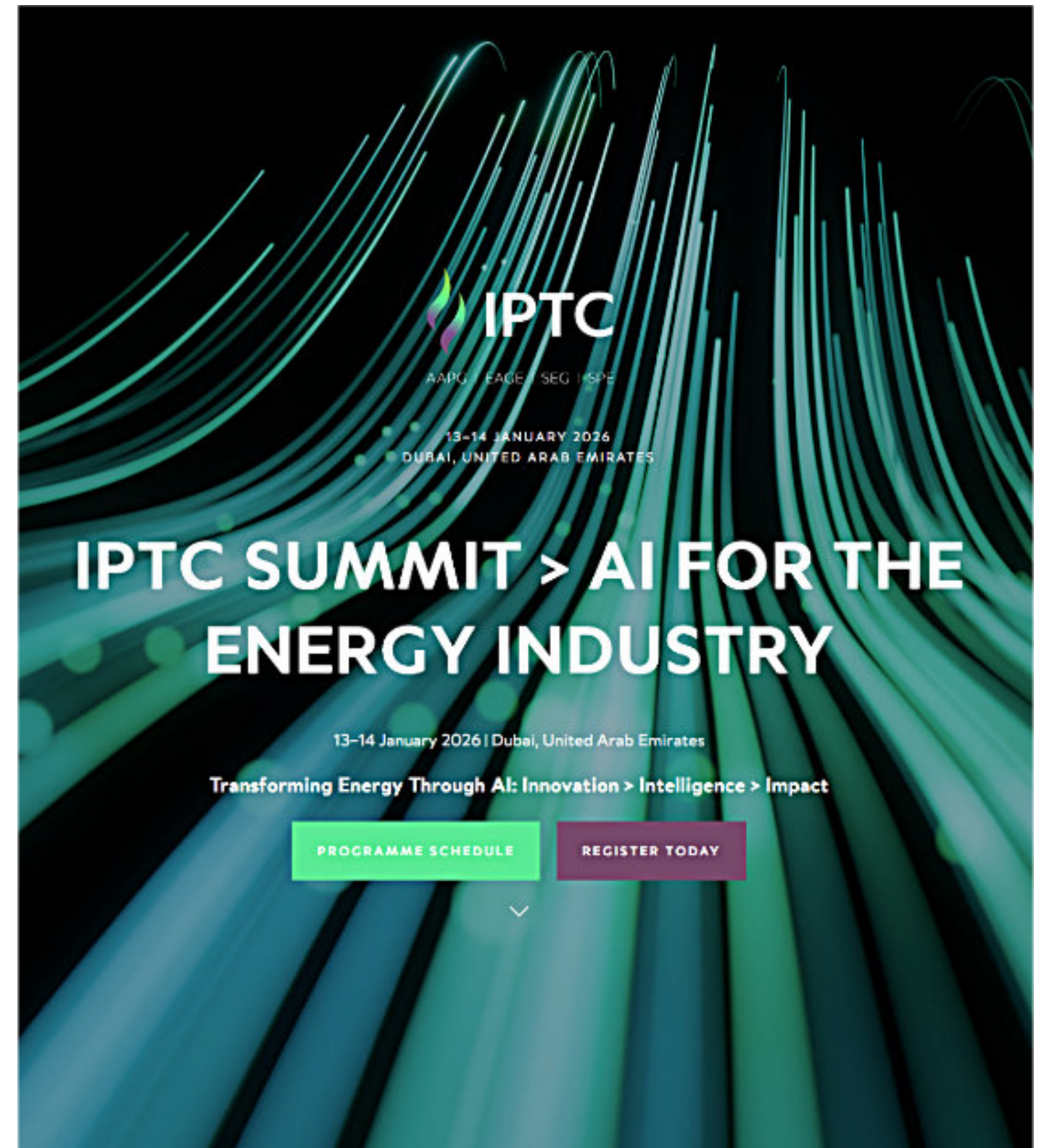
Notes on pioneers in the geosciences: a maximum of 4 pages

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

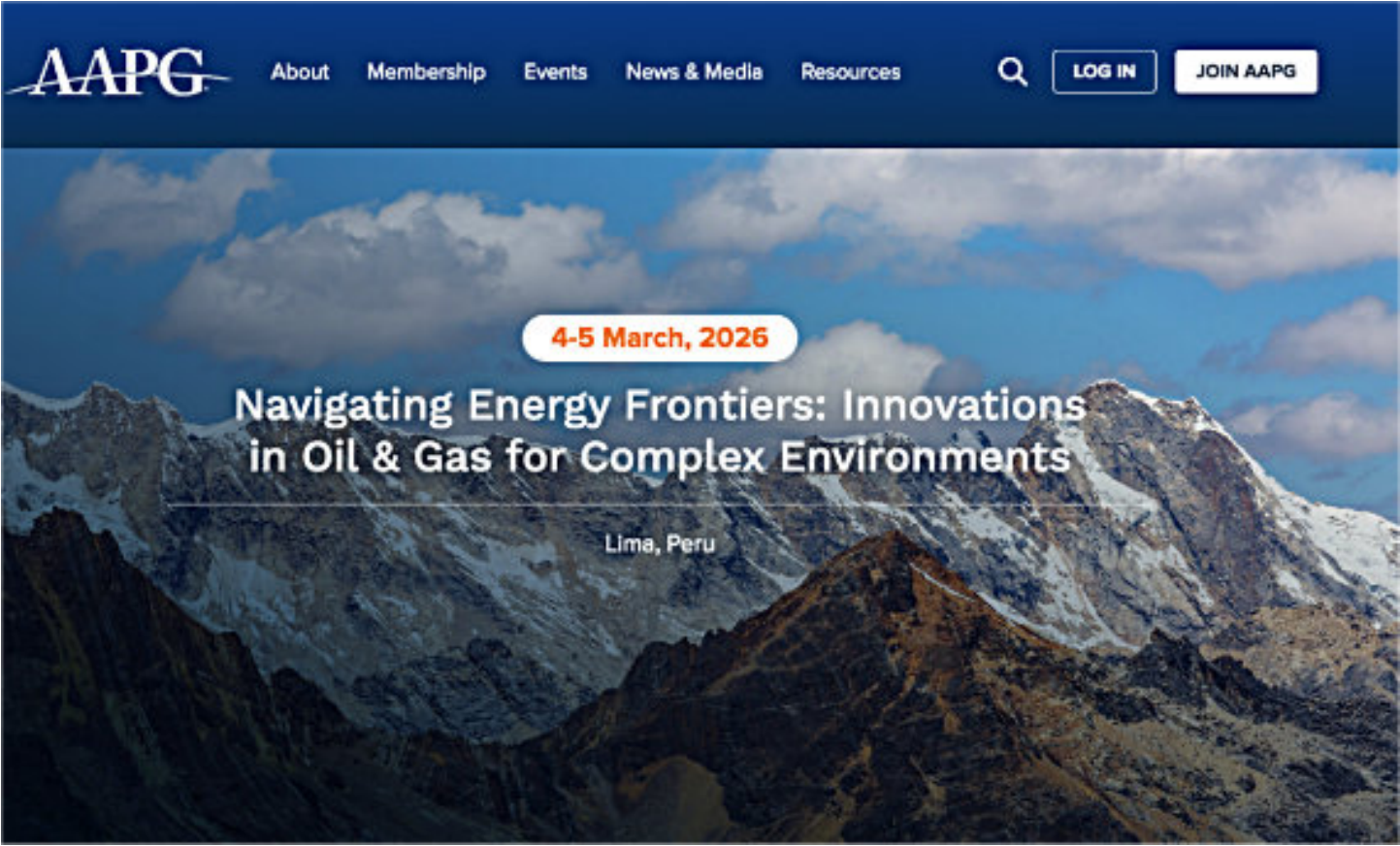
Geological notes: a maximum of 10 pages



<https://www.iptcnet.org/>



<https://www.aapg.org/events/details/event/articleid/69338/navigating-energy-frontiers-innovations-oil--gas-for-complex-environments>



Benefits by Level

Benefit	Diamond \$25,000+	Platinum \$15,000+	Gold \$10,000+	Silver \$7,500+	Bronze \$5,000+	Patron \$2,500+
Workshop registrations (\$795 value)	5	3	2	1	1	
\$100 discount on additional professional registrations	X	X	X	X	X	
Logo on email blasts	X	X	X			
Recognition during Opening & Closing Ceremony	X	X	X	X		
Logo on event schedule	X	X	X	X		
Logo on event walk-in slides	X	X	X	X	X	
Logo on on-site signage	X	X	X	X	X	
Logo on event website	X	X	X	X	X	X

SPONSORSHIP

DICIEMBRE
SUPLEMENTO
2025

EDICIÓN
ESPECIAL XXVII



Análisis comparativo entre geoestadística de variogramas y geoestadística de múltiples puntos para el modelado de yacimientos petrolíferos

Lisbett S. Materano-Escalona.....14

Petrografía y geoquímica de basaltos olivínicos iddingsitizados del campo volcánico las esperanzas–kakanapo, region de Coahuila, México

Antonio Rodríguez Vega, Roberto Díaz Martínez, Jesús Antonio Blanco Moreno.....31

La geología en el diseño de etiquetas de vino: estilos, temas y significado

Jesús S. Porras Moreno.....46

Inyección somera de aguas producidas de yacimientos de petróleo: 1. Aceptabilidad ambiental del sistema acuífero

Leslie F. Molerio León.....67

Inyección somera de aguas producidas de yacimientos de petróleo: 2. Complementos de la tecnología

Leslie F. Molerio León.....110

important contributions in geosciences promise to revolutionize o&g&m exploration

Edinson D. Alvarez S.....177

Introducción a la Geología del Plioceno-Cuaternario de Cuba

Manuel A. Iturralde-Vinent.....216

Análisis comparativo entre geoestadística de variogramas y geoestadística de múltiples puntos para el modelado de yacimientos petrolíferos

Materano-Escalona Lisbett Susana

¹Centro de Investigaciones de Geociencias Aplicadas - Universidad Autónoma de Coahuila 5 de febrero esq. con Blvd. Simón Bolívar #303-A Col. Independencia C.P. 26830 Nueva Rosita, Coahuila, México

*lmaterano@uadec.edu.mx

RESUMEN

La geoestadística constituye una herramienta fundamental en la generación de modelos de yacimientos más reales mediante la simulación de las características geológicas presentes en el subsuelo. Entre los métodos geoestadísticos disponibles que intentan reproducir las geometrías de cuerpos sedimentarios destacan la simulación secuencial de variables indicadoras (SIS) con el uso de los variogramas, y la estadística de múltiples puntos (MPS) que se fundamenta en el uso de imágenes de entrenamiento y estadísticas de múltiples puntos; éste último ha demostrado ser una alternativa muy efectiva para la reproducción de ambientes sedimentarios. Se realizó un análisis comparativo del desempeño relativo de los métodos geoestadísticos en el modelado estático y dinámico de un yacimiento real de un sistema sedimentario fluvial, ubicado al este de la Cuenca del Lago de Maracaibo - Venezuela, utilizando medidas de desempeño como: el significado geológico de las realizaciones, el impacto en el modelado estático y dinámico, y de costo computacional. Bajo este contexto, MPS demostró ser una alternativa efectiva en la reproducción de las facies de canal de meandro, llanura de inundación y abanicos de rotura, a cambio de un alto costo computacional, que bien pudiera justificarse a la luz de los beneficios obtenidos, como por ejemplo una reproducción más real del ambiente sedimentario.

Palabras claves: geoestadística, variables indicadoras, simulación basada en estadística de múltiples puntos, MPS, modelo estático.

ABSTRACT

Geostatistics today constitutes a fundamental tool in the search for generating more realistic models of deposits by simulating the existing geological features in the subsoil. Among the

available geostatistical simulation methods that attempt to reproduce sedimentary bodies and their geometries two stand out, the Variables Sequential Indicator Simulation (SIS) that relies on the use of variograms, and the newest Simulation based on Multiple Point Statistics (MPS) which relies on the use of training images and multi-point statistics. The latter has shown the potential to be a more effective alternative for the reproduction of sedimentary environments than the one based on variograms. This work offers a comparative analysis of the relative performance of the methods mentioned before in the static and dynamic modeling of a reservoir located east of the Lake Maracaibo Basin in Venezuela, using performance measures that consider the geological significance of the realizations, the impact on static and dynamic modeling, and computational cost. MPS proved to be an effective alternative in the reproduction of sedimentary environments in exchange for a high computational cost, which could well be justified in light of the benefits obtained.

keywords: *geostatistics, indicator variables, multi-point statistical based simulation, static model, MPS.*

INTRODUCCIÓN

La generación de modelos de yacimientos de hidrocarburos es importante para comprender y predecir los componentes geológicos, geofísicos y de ingeniería. Por este motivo, su construcción debe centrarse en el objetivo final, que puede ser la cuantificación de reservas, la estimación del petróleo original in situ (POES), la localización exitosa de un pozo, el diseño de métodos de recuperación o la estimación de pronósticos de producción. Estos modelos permiten integrar conocimientos y datos de diferentes disciplinas y proporcionar uno o más modelos numéricos alternativos que representen los aspectos geofísicos, geológicos y de ingeniería del yacimiento del subsuelo (Caers, 2005). La geoestadística en su sentido más amplio es la rama de las ciencias estadísticas que estudia los fenómenos espaciales-temporales y evalúa las relaciones espaciales para predecir los posibles valores de la variable en lugares no observados ni muestreados (Deutsch, 2002; Pyrcz & Deutsch, 2014). En términos generales, la geoestadística utiliza la distribución espacial de las variables aleatorias del yacimiento con baja incertidumbre, a partir de valores puntuales (medidos o calculados), para estimar la propagación de dichas propiedades en un área definida. De este modo, es capaz de proporcionar una medida de incertidumbre o de

desviación de estas distribuciones y, por tanto, de discretizar e interpretar las realizaciones obtenidas a partir de las propiedades del yacimiento (Deutsch, 2002; Pyrcz, et al., 2008).

Entre los métodos geoestadísticos de simulación de facies disponibles, y considerando el objetivo de este trabajo, destacan dos enfoques principales. El primero es la simulación secuencial de variables indicadoras (SIS), basada en el método clásico del variograma, el cual cuantifica el promedio del cuadrado de las diferencias entre los valores de la variable de interés (z) en función de la distancia (h) para todos los pares de puntos separados por un vector h . Este enfoque tiene sus orígenes en los trabajos pioneros de Georges Matheron y Daniel Krige en la década de los 60 (Deutsch, 2002; Pyrcz et al., 2008).

El segundo enfoque corresponde a los métodos de simulación basados en estadísticas de múltiples puntos (MPS), propuestos inicialmente por Journel (1992) y posteriormente perfeccionados por Strebelle (2002). Su objetivo es reproducir patrones espaciales complejos mediante el uso de una imagen de entrenamiento (TI), la cual contiene las posibles configuraciones espaciales de cualquier cuerpo y relaciones geológica dada entre los objetos, capturando patrones geológicos como la conectividad y curvilinearidad (Deutsch & Journel, 1998; Caers & Zhang, , 2002; Rezaee, et al., 2013; Strebelle, 2012).

La geoestadística de múltiples puntos (MPS) permite capturar y reproducir patrones espaciales a partir de múltiples puntos simultáneamente, mejorando la representación de estructuras geológicas más realistas. El método se basa en la extracción de patrones de una imagen o modelo de entrenamiento, logrando así una mayor fidelidad en la simulación de heterogeneidades espaciales. Mientras que, la geoestadística tradicional basada en el variograma únicamente analiza el comportamiento de la variable de interés a partir de pares de puntos. Es decir, el variograma caracteriza los patrones espaciales considerando únicamente relaciones bivariadas, lo que implica una capacidad limitada para representar adecuadamente patrones geológicos complejos, como la conectividad, la curvilinearidad, o estructuras con geometrías no lineales (Deutsch, Geostatistical reservoir modeling, 2002; Strebelle, 2012).

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar, mediante diversas medidas de desempeño un caso real de un yacimiento petrolífero, y determinar qué método de simulación resulta más favorable, así como cuantificar el impacto de cada método en la incertidumbre asociada

a la estimación del petróleo original en sitio (POES), al pronóstico de producción y a la calidad de las realizaciones generadas. Con ello, se busca fundamentar una elección adecuada del método de simulación de facies.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Selección del caso de estudio

Se seleccionó un yacimiento que contaba con un modelo geológico previamente definido y evaluado, que posee información sobre las facies sedimentarias, propiedades petrofísicas, continuidad espacial del modelo sedimentológico, y con la información básica requerida para el cálculo de POES. El yacimiento fue identificado con el nombre LSME-01. El caso de estudio seleccionado corresponde a un yacimiento ubicado en el estado Zulia – Venezuela, conformado por 325 pozos (3 de los cuales se consideraron como pozos control) con unidades estratigráficas identificadas como: unidad A, B, C (unidades superiores), unidad D y E (unidades inferiores) de la Formación Isnotú, de edad Mioceno, con mallado 3D con un total de 4.141.800 celdas, de dimensión unitaria 50 x 50 m, distribuidas con una dimensión total de 65 x 295 x 216 celdas, cubriendo un área de aproximadamente 20 km² y espesor variable desde 4 hasta 12 pies aproximadamente.

2. Validación de datos

- a) Se validó el modelado de la continuidad espacial de las facies a lo largo de cada una de las unidades (A, B, C, D y E), se tomó en cuenta principalmente las características y el sentido de depositación de los sedimentos en el yacimiento. Del modelo geológico previamente definido, se validó el modelo sedimentológico, tomando como referencia la propuesta de Hocker (1985), quien determinó que la dirección de los canales varía en respuesta a dos áreas que constituyen distintas fuentes de aporte de sedimentos, en dirección NE-SW para las unidades D y E, y E-W para el intervalo comprendido desde las unidades A, B y C.
- b) Se reprodujo el modelo 3D del yacimiento en un simulador comercial, a partir de datos estructurales, estratigráficos, sedimentológicos y petrofísicos. Obteniendo el mallado del modelo 3D con las dimensiones originales.

3. Control de calidad sobre las propiedades sedimentológicas y petrofísicas

Se realizaron los siguientes análisis gráficos:

- a) Análisis de permeabilidad vs profundidad por facies
- b) Análisis de permeabilidad vs porosidad por facies
- c) Análisis de porosidad vs profundidad por facies
- d) Validación de porosidad efectiva-permeabilidad y facies por pozo.
- e) Curva de proporción vertical de facies.
- f) Validación del escalamiento de facies y propiedades petrofísicas a la malla.

4. Caso de simulación dinámica

Se consideró como horizonte de producción 10 años. Debido a la confidencialidad del yacimiento de estudio, no se tuvo acceso a la historia de producción, por lo que el modelo no se cotejó con su comportamiento dinámico (*history matching*) sino que se utilizaron los parámetros establecidos por defecto por la aplicación. En la Tabla 1 se muestran las propiedades utilizadas para el caso de simulación, siendo la misma para los 30 casos generados por los métodos de simulación de facies SIS y MPS, las propiedades petrofísicas fueron estimadas por *Kriging* ordinario, a partir de la muestra y condicionadas a las facies para cada método. Se consideró un tipo de petróleo liviano, y se simplificó el modelo a un esquema de explotación que consta de 3 pozos inyectoros.

Tabla 1. Propiedades generales para simulación dinámica.

Propiedad	Valor
Densidad del petróleo [lb/ft³]	54,64
°API	30
Densidad del gas [lb/ft³]	0,05
Presión de referencia [psia]	4351,1
Profundidad de referencia [ft]	3600
Contacto agua-petróleo [ft]	5577,4
Presión de burbuja [psia]	1160,3
Rs – constante [MSCF/STB]	0,1842
Pozos inyectoros/productores	3/0
Presión de fondo fluyente - productores [psia]	4000
Saturación inicial de petróleo – promedio	0,6

5. Medidas de desempeño para evaluar la calidad de las realizaciones de facies

En base a revisión bibliográfica, se seleccionaron diferentes medidas que evaluaron el desempeño de los métodos de simulación de facies aplicados al caso de estudio, las mismas se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Medidas de desempeño para evaluar las realizaciones de facies por SIS y MPS

	Medida de desempeño, autores	Definición
Aspectos geológicos	1. Reproducción del ambiente sedimentario y sus geometrías (Strebelle S, 2002; Matias, 2014)	Se refiere a la similitud de las realizaciones de ambos métodos con el modelo validado del yacimiento del caso de estudio.
	2. Diferencia con respecto a la proporción de facies (Caers & Zhang, 2002; Liu, 2006; Strebelle & Journel, 2001).	Se basa en comparar y analizar el histograma proveniente de la muestra (facies escaladas) con los histogramas provenientes de las simulaciones con SIS y MPS.
	3. Diferencia con respecto a los parámetros de variogramas: dirección preferencial, modelo, rangos, sill	Analiza la conservación de la continuidad espacial de las facies, comparando los variogramas reportados inicialmente en la documentación del caso de estudio (de la muestra) contra los variogramas resultantes de las diferentes simulaciones con SIS y MPS.
	4. Error en pronóstico de facies (pozos control)	Para esta medida de desempeño se tomaron 3 pozos control, los cuales no se incluyeron en las simulaciones de facies, luego hacer una comparación entre el registro de facies escalado y la celda resultante de dicha localización para cada una de las simulaciones con SIS y MPS.
Impacto en el modelo estático	5. Error e incertidumbre en la estimación del POES	Se midió a través de una comparación entre el POES reportado a partir de múltiples realizaciones con SIS y MPS versus el POES ofrecido por el reporte original.
Impacto en el modelo dinámico	6. Incertidumbre en pronósticos de producción	Evalúa el impacto en la incertidumbre de ambos métodos en el pronóstico de la producción para un horizonte determinado (10 años)
Costo computacional	7. Tiempo de corrida de la simulación (Caers & Zhang, 2002; Liu, 2006; Maharaja & Journel, 2005; Strebelle & Journel, 2001; Huysmans & Dassargues, 2009)	Se evalúa el tiempo necesario para generar las realizaciones para cada método, esta medida está asociada a la capacidad del CPU donde se estén realizando las simulaciones

6. Generación de modelos de yacimientos equiprobables a partir de la MPS

La simulación por geoestadística multipuntos se realizó utilizando el algoritmo SNESIM (Strebelle S., 2002) empleando como parámetros de referencia los utilizados por Liu (2006), los parámetros utilizados fueron:

i. Generación de imagen de entrenamiento:

a) *Tamaño de la malla*: se realizó análisis de sensibilidad con diferentes tamaños hasta que se logró un tamaño que ofreció un buen resultado: Tamaño de la malla del modelo del yacimiento: 65x295x216

Tamaño de la malla de la imagen de entrenamiento: 70x153x10

b) *Proporción de facies de la malla de entrenamiento*: se tomó en cuenta el criterio propuesto por Liu (2006), donde recomienda que la proporción de facies sea lo más parecido a la proporción de facies del modelo del yacimiento, por lo que se utilizó igual a la muestra; Proporción de facies del modelo del yacimiento, canal meandriforme: 2,2%, abanico de rotura: 0,7 %, llanura de inundación: 9,2%

Proporción de facies de la malla de entrenamiento: igual a la muestra

ii. Creación del patrón

a) *Geometría del patrón*: se consideró lo recomendado en la aplicación comercial, justificándose, además, por el tipo de ambiente que se está reproduciendo ya que tiene una orientación preferencial en una dirección, por lo que al ser el patrón de geometría elíptica permite captar más información en una dirección seleccionada, además que al realizar algunas iteraciones se observó que ofrece mejores resultados y es más rápido en tiempo de proceso.

Geometría del patrón: elipsoidal

b) *Radio (radio efectivo)* = calculado según la ecuación sugerida por la aplicación comercial, donde R: radio, C: celdas en cada dirección y m: número de multigrillas

$$R = \frac{C(I, J, K)}{2 * 2^{(m-1)}} -$$

Radio: 9x19x1

c) *Número de multigrilla*: este parámetro también se consideró según lo sugerido por la aplicación, ya que se considera rápido y además un numero de multigrillas suficiente como para captar tendencia regional.

Número de multigrilla = 3

d) *Máximo número de celdas informadas*: se realizaron diferentes iteraciones, se optó por trabajar con el porcentaje sugerido por la aplicación, ya que se consideró suficiente y con un tiempo de procesamiento aceptable

Máximo número de celdas informada: 10 % del número de las celdas del patrón de búsqueda

iii. Modelado de facies

a) *Nivel de confianza en la fracción*: para definir este parámetro se realizaron diferentes iteraciones con valores variables desde 0.5 hasta 1, siendo 0.9 el mejor resultado ya que respeta tanto la proporción de facies como la geometría de los canales.

Nivel de confianza en la fracción= 0,9

b) *Escalado*: no fue necesario cambiar las dimensiones de facies para realizar las simulaciones, debido a que la imagen de entrenamiento tiene el tamaño suficiente para representar las geometrías de facies.

c) *Rotación de facies*: se aplicó rotación de facies para las unidades inferiores, correspondiente a las Unidades D y E, ya que de acuerdo al modelo conceptual y los diferentes estudios geológicos estas unidades cambian de dirección respecto a las unidades superiores y presentan un mismo ambiente con geometrías de los cuerpos similares.

Rotación de facies=70°

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Reproducción del ambiente sedimentario y sus geometrías

Al llevar a cabo múltiples simulaciones de facies con ambos métodos se observó que el método MPS reproduce mejor el ambiente sedimentario al representar más adecuadamente la continuidad y conexión de los canales. En la Figura 1 y 2 se muestra la simulación con ambos métodos para las unidades superiores, ilustrando las unidades A y B en la capa 1 y 55

respectivamente, MPS conserva la geometría de los cuerpos con una buena definición de la orientación de los canales con comportamiento meandriforme, recordando que según el modelo conceptual dicha orientación está definida alrededor de 135 grados, mientras que para la simulación con SIS la distribución de la facies de canal se observa menos continua en algunas capas y, en varias zonas no se conserva la geometría de los canales.

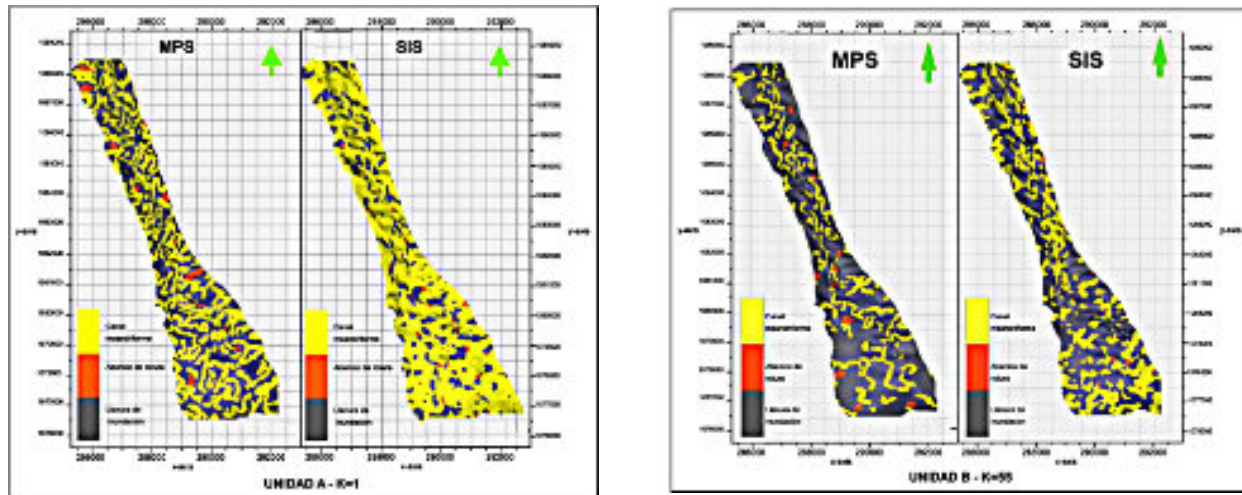


Figura 1a). Vista comparativa de simulación de facies con MPS y Figura 1b) simulación de facies con SIS en la unidad A en la capa 1

Figura 2a). Vista comparativa de simulación de facies con MPS y Figura 2b) simulación de facies con SIS en la unidad B en la capa 55

Las Figura 3 y 4 muestran simulaciones representativas para las unidades inferiores (unidades D y E), aun cuando el número y calidad de los datos a estas profundidades es menor, la simulación con MPS conserva la geometría de los cuerpos y en mayor proporción una buena definición de la orientación de los canales sinuosos; mientras que para la simulación con SIS la distribución de la facies canal se puede considerar muy limitada, no se aprecia la orientación ni geometría de estos, generando en la mayoría de las capas puntos dispersos que intentan representar los canales.

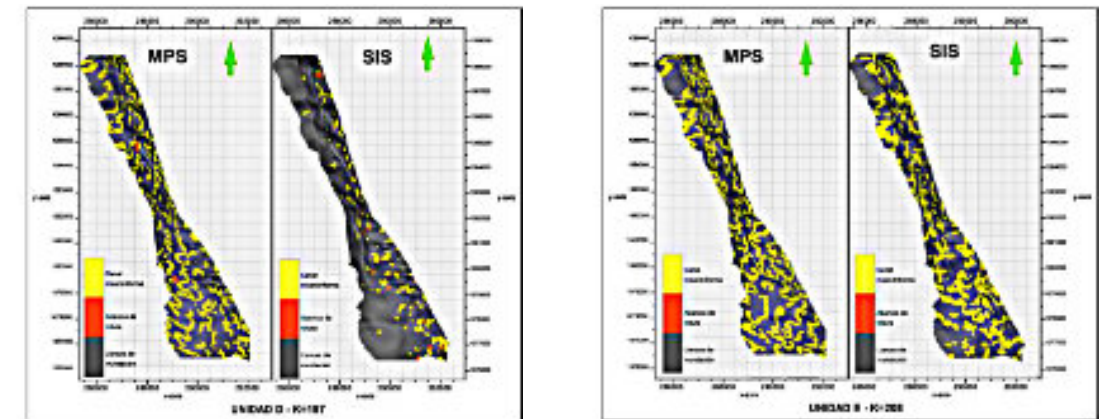


Figura 3a). Vista comparativa de simulación de facies con MPS y Figura 3b) simulación de facies con SIS en la unidad D, capa 197

Figura 4a) Vista comparativa de simulación de facies con MPS y Figura 4b) simulación con SIS en la unidad E, capa 208

Diferencia con respecto a la proporción de facies

Para este análisis se seleccionaron aleatoriamente 30 realizaciones de facies generadas con ambos métodos de simulación MPS y SIS. A partir de ellas, se verificó la proporción de cada facies (canal meandriforme, abanico de rotura y llanura de inundación) y se comparó con la muestra de referencia obtenida de los registros escalados.

En las unidades superiores, ambos métodos reprodujeron adecuadamente las proporciones observadas respecto a la muestra. En el caso de SIS, las facies de canal y abanico presentaron la misma proporción tanto en las simulaciones como en los registros escalados, mientras que la diferencia para la llanura de inundación fue menor a 1%. De manera similar, las simulaciones con MPS mostraron discrepancias muy bajas, también menores a 1% entre el registro escalado y las realizaciones (ver Figura 5a).

En las unidades inferiores, el método SIS mantuvo una mejor proporción de facies, registrando una diferencia menor a 3% principalmente para los canales, lo cual se considera aceptable. En contraste, MPS mostró discrepancias más notorias entre las proporciones del registro escalado y la simulación. Esta diferencia parece estar asociada a la escasez de datos disponibles en profundidad y, en algunos casos, a su calidad limitada.

Cuando los datos son insuficientes, la imagen de entrenamiento se convierte prácticamente en la única fuente de probabilidad para la asignación de facies en MPS. El parámetro

“confidence level in fraction” permite ajustar el nivel de confianza en las proporciones de facies definidas por dicha imagen.

En zonas con pocos datos, únicamente es posible aproximarse al escalado de pozos reduciendo de manera significativa este nivel de confianza. Sin embargo, este ajuste implica el riesgo de comprometer la correcta representación del ambiente sedimentario. Por ello, la elección del valor de este parámetro debe alinearse con los objetivos de la simulación y con el grado de confiabilidad de los datos duros, el cual, en el caso de las unidades inferiores de este estudio, se consideró bajo (ver Figura 5b).

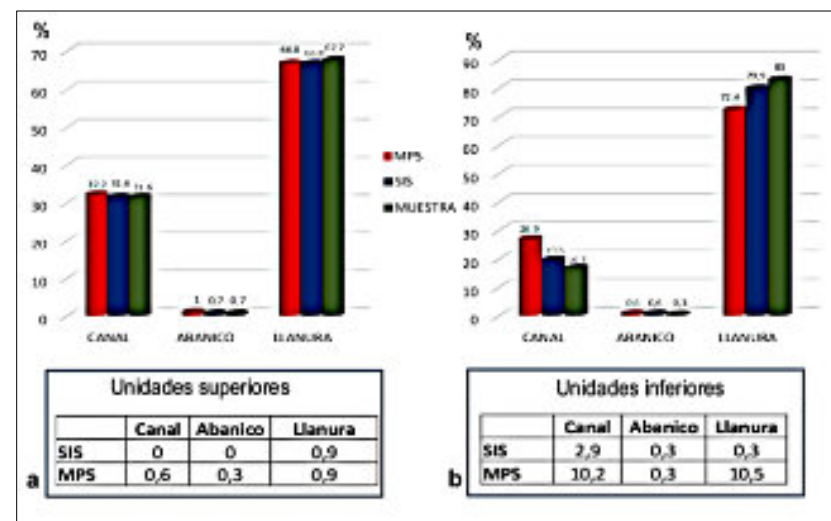


Figura 5. Diferencia entre registro escalado, simulación MPS y SIS para las unidades superiores (Figura 5a) y unidades inferiores (Figura 5b).

Conservación de parámetros de variogramas

Se realizó análisis y modelado de la continuidad espacial a diez de las simulaciones de cada método, es decir, MPS y SIS. Las Tabla 3 (unidades superiores) y Tabla 4 (unidades inferiores) presentan un resumen comparativo de estos resultados con respecto al modelo de continuidad espacial reportado a partir de la muestra. El análisis de esta medida se consideró en función de los parámetros cuyos resultados fueron más significativos:

- *Dirección principal de continuidad:* para ambos métodos se conservó la dirección de continuidad definida en el modelo conceptual. Para las unidades superiores se mantuvo

la dirección mayor de 135°, mientras que para las unidades inferiores se preservó la dirección mayor 70°.

- *Rangos horizontales (rango mayor y rango menor):* se observó que el comportamiento de la simulación con MPS se inclina hacia los valores reportados para la muestra. Esto se evidenció en desviaciones estándar menores en comparación con las obtenidas con SIS, lo cual sugiere que MPS tiende a reproducir de manera más fiel la continuidad horizontal observada en los datos. Este comportamiento es más consistente en las unidades superiores que en las inferiores (ver Tablas 3 y 4).
- *Rango vertical:* se observó que la simulación con SIS tiende a acercarse más al rango obtenido a partir de la muestra. Este resultado puede atribuirse a que SIS integra explícitamente el apilamiento de facies y la secuencia vertical definida a lo largo del perfil. En contraste, MPS se encuentra limitado por el espesor vertical establecido en el modelo conceptual representado en la imagen de entrenamiento, la cual en este caso fue definida con un solo nivel vertical. Esta tendencia fue similar tanto para las unidades superiores como para las inferiores (ver Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Resumen comparativo de modelo de continuidad espacial a partir de simulación de facies con SIS y MPS para las Unidades superiores (A, B y C)

	<i>nugget</i>		<i>sill</i>		Rango mayor		Rango menor		Rango vertical	
	Media	Des.Std	Media	Des.Std	Media	Des.Std	Media	Des.Std	Media	Des.Std
SIS	0,08	0,02	0,92	0,03	334,54	14,08	261,59	11,01	44,43	1,97
MPS	0,00	0,00	1,00	0,00	190,78	9,12	168,71	7,26	5,11	0
Original	0,03	--	0,98	--	125,33	--	83,66	--	30,33	--

Tabla 4. Resumen comparativo de modelo de continuidad espacial a partir de simulación de facies con SIS y MPS para las Unidades inferiores (D y E)

	<i>nugget</i>		<i>sill</i>		Rango mayor		Rango menor		Rango vertical	
	media	Des.Std	media	Des.Std	media	Des.Std	media	Des.Std	media	Des.Std
SIS	0,08	0,03	0,90	0,04	234,64	83,67	249,89	20,69	34,79	12,31
MPS	0,02	0,04	0,96	0,05	173,48	61,90	183,45	14,98	7,91	9,78
Original	0,03	--	1,00	--	106	--	79	--	23	--

Error en pronóstico de facies (pozo control)

Para evaluar el desempeño de los métodos aplicados, se utilizaron tres pozos cuyos datos no fueron incluidos inicialmente en las simulaciones. Esto permitió determinar el porcentaje de acierto de las realizaciones generadas por cada método a lo largo de la trayectoria de dichos pozos.

Del análisis comparativo de esta medida de desempeño se observó que tanto SIS como MPS presentan medianas similares en los porcentajes de acierto, con rangos de 67–62% para SIS y 59–65% para MPS. Aunque visualmente ambos métodos muestran un comportamiento comparable (ver Figura 6), es importante destacar que los resultados obtenidos con MPS son más robustos: sus desviaciones estándar se encuentran entre 2,38 y 3,28, mientras que las de SIS son considerablemente mayores, variando entre 4,24 y 14,16.

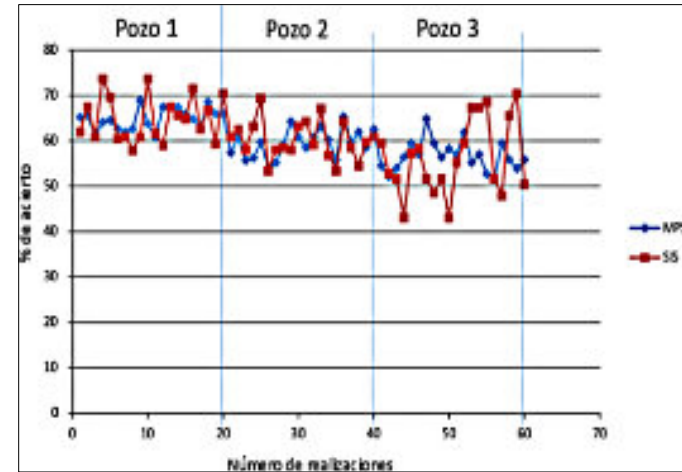


Figura 6. % de acierto de los pozos control respecto a las múltiples simulaciones de facies de cada Método.

Error e incertidumbre en la estimación de POES

La estimación del POES fue obtenida a partir de 152 realizaciones, utilizando como datos de entrada las simulaciones obtenidas con cada método. Para esta medida de desempeño, ambos métodos ofrecen resultados similares de variabilidad (errores relativos de 3 y 5% en las medianas de las estimaciones de SIS y MPS respectivamente) y tendencia central respecto al POES de la muestra de 1983 MMBN (ver tabla 5).

Tabla 5 Resumen estadístico de resultados de POES a partir de cada método de simulación de facies.

SIS		MPS	
Mediana	2.043	Mediana	2.083
Desviación estándar	10,49	Desviación estándar	6,31
Mínimo	2.018	Mínimo	2.069
Máximo	2.069	Máximo	2.099

Incertidumbre en pronósticos de producción

Se evaluó la incertidumbre de ambos métodos en el pronóstico de la producción para un horizonte de 10 años, considerando 30 casos por métodos. Para MPS arrojó una menor variación de los resultados (Figura 7), aunque en términos porcentuales, la diferencia no es significativa ya que para ambos métodos esta alrededor de 2.5% y 4.5% la incertidumbre (Tabla 6).

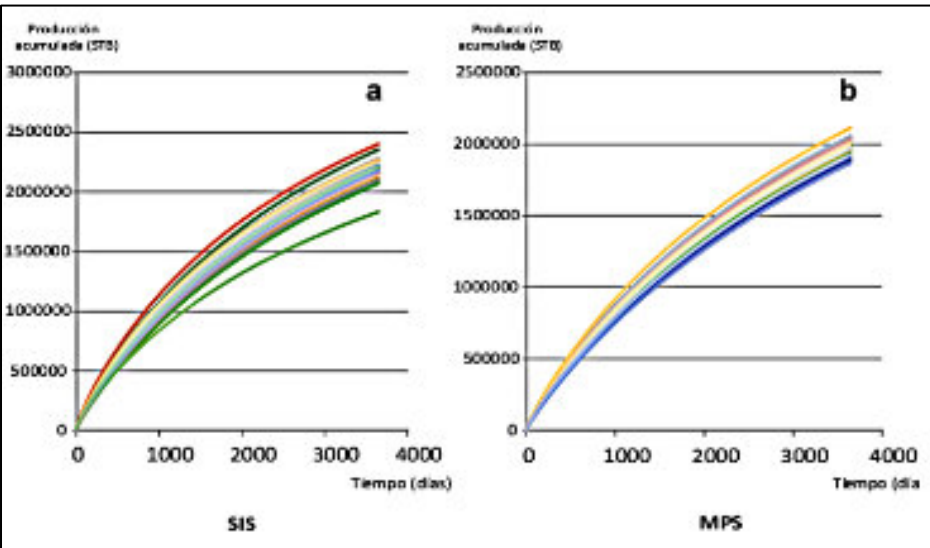


Figura 7. Producción acumulada a la izquierda a partir de SIS y a la derecha a partir de MPS.

Tabla 6. Estadística descriptiva de producción acumulada a partir de las simulaciones de facies con MPS y SIS

Producción acumulada SIS (STB)		Producción acumulada MPS (STB)	
Mediana	2.196.010,8	Mediana	1.993.616,5
Desv. Estándar	99.889,27	Desv. estándar	55.176,26
Mínimo	1.827.503,90	Mínimo	1.862.259,30
Máximo	2.400.976,50	Máximo	2.114.548,30

Tiempo de corrida de la simulación

Esta medida de desempeño está condicionada principalmente por las características de la máquina utilizada para ejecutar las simulaciones. En este estudio se empleó una PC de 64 bits con procesador Intel i7-2600 CPU @ 3.40 GHz y 16 GB de memoria RAM (DDR3). Se realizaron múltiples iteraciones para obtener tiempos promedio: el método SIS requirió aproximadamente 22 segundos para generar una realización de facies, mientras que MPS necesitó alrededor de 173 segundos.

El menor tiempo de ejecución de SIS se debe a que la asignación de valores en las celdas vecinas al pozo se realiza de manera relativamente sencilla y directa. En contraste, el algoritmo SNESIM, utilizado en la simulación MPS, implica un proceso más lento: para simular cada celda, el algoritmo debe acceder al árbol de búsqueda y consultar las probabilidades asociadas. Cuando el árbol es grande, este proceso incrementa de forma notable el tiempo de cómputo. Además, en este estudio se empleó una imagen de entrenamiento con dimensiones equivalentes al tamaño del yacimiento, lo cual también contribuye al mayor tiempo de corrida en MPS.

A pesar de ello, el valor de los activos involucrados y el impacto que tiene un modelo de facies adecuado justifican el mayor costo computacional asociado al método MPS.

CONCLUSIONES

En este trabajo se comparó el desempeño de los métodos de simulación secuencial de variables indicadoras (SIS) y la simulación basada en estadística de múltiples puntos (MPS). Para ello, se evaluaron diversas medidas de desempeño: i) el significado geológico de las realizaciones, particularmente la capacidad de reproducir el ambiente sedimentario; ii) el

impacto en el modelado estático, incluyendo la estimación del POES; y iii) el impacto en el modelado dinámico, como la producción acumulada.

En términos generales, MPS mostró un desempeño superior, y en algunos casos equivalente al de SIS en todas las medidas evaluadas, con la única excepción del tiempo de simulación. El esfuerzo adicional requerido para la determinación de los parámetros de MPS se ve compensado por sus resultados más favorables, especialmente en lo referente a la reproducción más realista del ambiente de sedimentación.

Si bien el costo computacional asociado a MPS es significativamente mayor, la creciente disponibilidad de capacidad de cómputo hace cada vez más viable su implementación, proporcionando además la certeza de obtener un modelo de facies más cercano a la realidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Petrociencia por el apoyo intelectual y económico a lo largo de esta investigación (2015). Al Asesor de tesis el Dr. Efraín Nava, a los significativos aportes y colaboración del Ing. Elieser Domínguez. Así como también a los valiosos portes de Salvador Pintos, Diego Osorio y Néstor Queipo. Y al Subcomité de *Dry Runs & Peer Review* de GeoLatinas, particularmente a Lina Osorio, Humberto Carvajal y Manuel Martínez por sus comentarios en una versión previa de este manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Caers, J. (2005). *Petroleum Geostatistics*. Texas, USA: Society of Petroleum Engineers.
- Caers, J., & Zhang, , T. (2002). Multiple-point geostatistics: A quantitative vehicle for integrating geologic analogs into multiple reservoir models. *AAPG Mem*, 1-24.
- Deutsch, C. (2002). *Geostatistical reservoir modeling*. New York: Oxford.
- Deutsch, C., & Journel, A. (1998). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford.
- Hocker, C. (1985). *The Miocene Isnotú Formation in outcrops (States Zulia and Trujillo, W. Venezuela).),” MARAVEN – INTEVEP – SHELL, Enhanc. oil Recover. Res. Maraven D85013, p. 69.*
- Huysmans, M., & Dassargues, A. (2009). Application of multiple-point geostatistics on modelling groundwater flow and transport in a cross-bedded aquifer (Belgium),”. *Hydrogeology*, 17(8), 1901–1911. doi:10.1007/s10040-009-0495-2
- Liu, Y. (2006). Using the Snesim program for multiple-point statistical simulation. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1544–1563. doi:10.1016/j.cageo.2006.02.008

Matías, C. (2014). *Implementación de un algoritmo para la simulación estocástica de modelado de facies, basado en el método de geoestadística multipunto*. Caracas, Venezuela: Teis de maestría, Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2014.

Maharaja, A., & Journel, A. (2005). Hierarchical simulation of multiple-facies reservoirs using multiple-point geostatistics. *Proc. -SPE Annu. Tech. Conf. Exhib*, 939–953. doi:10.2118/95574-ms

Pyrz, M., & Deutsch, C. (2014). *Geostatistical reservoir modeling*. Oxford University Press.

Pyrz, M., Boisvert, J., & Deutsch, C. (2008). A library of training images for fluvial and deepwater reservoirs and associated code. *Computers & Geosciences*, 34(5), 542-560. doi:https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.015

Rezaee, H., Mariethoz, G., Koneshloo, M., & Asghari, O. (2013). Multiple-point geostatistical simulation using the bunch-pasting direct sampling method. *Comput. Geosci*, 54, 293–308. doi:https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.020

Strebelle, S. (2002). *Integration of Sequence Stratigraphy Concepts Into Multiple-Point Geostatistical Models*. Proceedings of IAMG.

Strebelle, s. (2012). Multiple-Point Geostatistics : from Theory to Practice. *Proc. Geostats*, 1-9.

Strebelle, S., & Journel, A. (2001). Reservoir Modeling Using Multiple-Point Statistics. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*(SPE-71324-MS). doi:https://doi.org/10.2118/71324-MS



Lisbett es docente investigador del CIGA-UAdeC. Dra. en Ciencias. Sus áreas de investigación se enfocan en geología del petróleo (modelado geológico) y geología ambiental (evaluación de contaminantes en entornos urbanos). Promueve la educación en comunidades vulnerables y la equidad en STEAM. Co-lidera la iniciativa de GeoSeminarios en español para la divulgación de geociencias, facilitando espacios de aprendizaje y colaboración. Es miembro activo de GeoLatinas. Su labor ha sido reconocida con el Reconocimiento UadeC a la Mujer Universitaria 2022-2023.

PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE BASALTOS OLIVÍNICOS IDTINGSITIZADOS DEL CAMPO VOLCÁNICO LAS ESPERANZAS–KAKANAPO, REGIÓN DE COAHUILA, MÉXICO

Por Antonio Rodríguez Vega. Roberto Díaz Martínez. Jesús Antonio Blanco Moreno (1)

(1) Escuela Superior de Ingeniería Lic. Adolfo López Mateos. Universidad Autónoma de Coahuila. Nueva Rosita, San Juan de Sabinas, Coahuila. México.

Correspondencia: arvega48@yahoo.com

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo el estudio petrográfico y geoquímico de los basaltos alcalinos olivínicos que se suponen asociados a un vulcanismo de tipo fisural, distribuidos en los límites del campo volcánico Las Esperanzas–Kakanapo. Extensos mantos de estos basaltos del Plioceno–Pleistoceno afloran en la Cuenca Carbonífera de Sabinas. Una característica particular que los distingue es su extraordinaria iddingsitización, mediante la cual la iddingsita sustituye total o parcialmente a prácticamente todos los microfenocristales del olivino magmático primario que los constituye. Para llevar a cabo la presente investigación se realizaron trabajos de campo destinados a documentar las características texturales de los basaltos, describir sus afloramientos característicos y obtener muestras representativas. Durante los trabajos de laboratorio se determinaron los elementos químicos mayores, elementos minoritarios y elementos traza en muestras de basaltos previamente seleccionadas, y se prepararon las correspondientes láminas delgadas, las cuales fueron estudiadas con la ayuda del microscopio petrográfico con el fin de establecer su composición mineralógica detallada. Como resultado, se elaboraron tablas que reflejan las características geoquímicas de los basaltos y se obtuvieron numerosas fotomicrografías relacionadas con sus rasgos mineralógicos y texturales. Se concluyó que la iddingsita presente es de alta temperatura y se originó mediante un proceso deutérico asociado con líquidos residuales enriquecidos en volátiles, particularmente H₂O y CO₂, lo cual concuerda con la formación y presencia de iddingsita de alta temperatura y también de calcita en los basaltos estudiados.

Palabras clave: Basaltos olivínicos de Las Esperanzas–Kakanapo. Iddingsitización de alta temperatura. Alteración deutérica.

Abstract

The present study focused on the petrographic and geochemical characterization of olivine-bearing alkaline basalts interpreted as the products of fissural volcanism and distributed along the margins of the Las Esperanzas–Kakanapo volcanic field. Extensive Pliocene–Pleistocene basaltic flows crop out across the Sabinas Coal Basin. A distinctive feature of these volcanic rocks is their remarkable degree of iddingsitization, whereby iddingsite partially or completely replaces nearly all microphenocrysts of primary magmatic olivine. Fieldwork was undertaken to document the textural attributes of the basalt outcrops, describe their characteristic exposures, and obtain representative samples. In the laboratory, major, minor, and trace element compositions were determined from selected basalt specimens. Corresponding thin sections were prepared and examined petrographically in order to establish their detailed mineralogical composition. The investigation produced geochemical tables and numerous photomicrographs illustrating the mineralogical and textural features of the basalts. The results indicate that the iddingsite present is a high-temperature variety formed through a deuteric alteration process associated with residual fluids enriched in volatiles, particularly H₂O and CO₂. This interpretation is consistent with the occurrence of high-temperature iddingsite and associated calcite within the studied basalts.

Keywords: Olivine-bearing basalts from the Las Esperanzas–Kakanapo area. High-temperature iddingsitization. Deuteric alteration.

Introducción

En las regiones ubicadas al centro y norte de México se conocen numerosas áreas donde se han desarrollado campos volcánicos asociados con eventos de magmatismo intraplacas sinextensionales relativamente jóvenes, fundamentalmente ocurridos durante el Cenozoico tardío (Tpl) y el Cuaternario (Qpt). Particularmente en la región noreste de México, en los estados de Chihuahua y Coahuila son conocidos los campos volcánicos del Tpl-Qpt de Camargo, en Chihuahua, y Las Coloradas, Ocampo y Las Esperanzas en Coahuila (Valdez-Moreno, G., 2001, Aranda-Gómez, J.J., et al. 2003, Aranda-Gómez, J.J., et al. 2005, Aranda-Gómez, J.J., et al. 2007, Espinosa, J., et al. 2008).

El presente trabajo tiene la finalidad de dar a conocer algunos resultados obtenidos a partir de nuestras últimas investigaciones enfocadas en el estudio de las características geoquímicas y petrográficas de los basaltos del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo, con énfasis en los fuertemente iddingsitizados, que hasta el momento no habían sido estudiados con suficiente profundidad en ninguna de las investigaciones anteriormente realizadas, prestando especial atención a los procesos que condujeron a la iddingsitización del olivino constituyente de estos basaltos. Estos basaltos afloran en extensas áreas dentro de los límites de la conocida cuenca carbonífera de Sabinas, ubicada hacia la parte central-este del estado de Coahuila (Figura.1).

La primera alusión a los derrames de lava basáltica en la cuenca de Sabinas se remonta al año 1881 y se debe a Adams, en su trabajo "Carbones en México, Distrito de Santa Rosa". Luego, en 1941 Mulleried en su publicación "Actividad volcánica reciente en el oriente del Estado de Coahuila. México" describe la distribución y origen de los flujos de lavas en la región, señalando que los basaltos Las Esperanzas sobreyacen a la Fm. Reinos del Terciario tardío, ahora Conglomerados Sabinas de edad Plioceno, describiendo a los volcanes que los extravasaron como extrusiones lineales (Valdez-Moreno, 2001).

Los estudios más recientes y profundos relacionados con el campo volcánicos Las Esperanzas- Kakanapo fueron realizados por Valdez-Moreno, 2001, quien ofrece importantes datos de carácter petrológico y de edad absoluta de sus rocas.



Figura 1.- Ubicación geográfica del área de estudio en la región carbonífera (C. S.)

En correspondencia con Valdez-Moreno, 2001, los campos volcánicos Las Esperanzas-Kakanapo y Ocampo, son el resultado de un evento de vulcanismo alcalino intraplaca de carácter fisural, que dio lugar a basaltos alcalinos con olivino, hawaiitas y basanitas con nefelina normativa, así como algunos basaltos con hiperstena normativa, con una edad absoluta $40 \text{ Ar}/39 \text{ Ar}$ de aproximadamente 2.78 Ma, cuyas lavas llegaron a la superficie a través de fisuras ubicadas en el borde del anticlinal de Santa Rosa y cercanas a este, en el caso específico del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo, nuestro caso de estudio. Valdez-Moreno, 2001, considera que el campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo se puede dividir en dos zonas: occidental (Las Esperanzas) y oriental (Kakanapo). La parte occidental se caracteriza por extensos derrames de lavas, extravasados a través de fisuras

localizadas en el borde oriental del anticlinal de Sierra de Santa Rosa, las cuales formaron flujos que se extendieron hasta 12 km de distancia y rellenaron la paleotopografía existente. En la parte oriental del campo son comunes los derrames de lava que forman mantos con espesores de hasta 35 m. Las rocas del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo tienen una asociación mineralógica representada por $\text{Ol}+\text{Cpx}+\text{Pl}+\text{Oft} \pm \text{Ap}$. Según la clasificación TAS de Le Maitre et al. 2002. La composición de las rocas del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo varía desde basalto a hawaiita.

Breve caracterización geológica del campo volcánico Las esperanzas -Kakanapo.

Como se puede observar en la imagen satelital y en la carta geológica representadas en la Figura 2, la geología del área ocupada por el campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo es bastante simple, constituida por extensos afloramientos de mantos de basaltos de poco espesor distribuidos dentro de los límites de una cuenca constituida por una potente secuencia de rocas sedimentarias carbonatadas y terrígenas de edad cretácica, la cual es cubierta discordantemente en su mayor parte por rocas sedimentarias terrígenas del Plioceno y depósitos de sedimentos coluviales y aluviales cuaternarios, así como por los propios mantos de basalto, como se puede apreciar en la columna estratigráfica representada en la Figura 3.

De acuerdo con la Figura 2, los afloramientos de los mantos basálticos ocupan una superficie de aproximadamente 400 Km^2 , con el manto de mayor extensión ubicado al sur de la ciudad de Sabinas, que ocupa una superficie cercana a los 300 Km^2 , que incluye la localidad conocida como Kakanapo hacia su extremo noroccidental.

En correspondencia con lo observado en la Figura 2, todo parece indicar que los principales flujos de lava basáltica se asociaron con un sistema de fallas normales ubicadas en los límites del bloque levantado de la sierra de Santa Rosa (al oeste) y el bloque hundido correspondiente a la cuenca, originadas como consecuencia de esfuerzos extensionales póstumos asociados al desarrollo del sistema de Cuenas y Cordilleras norteamericano en su prolongación mexicana.

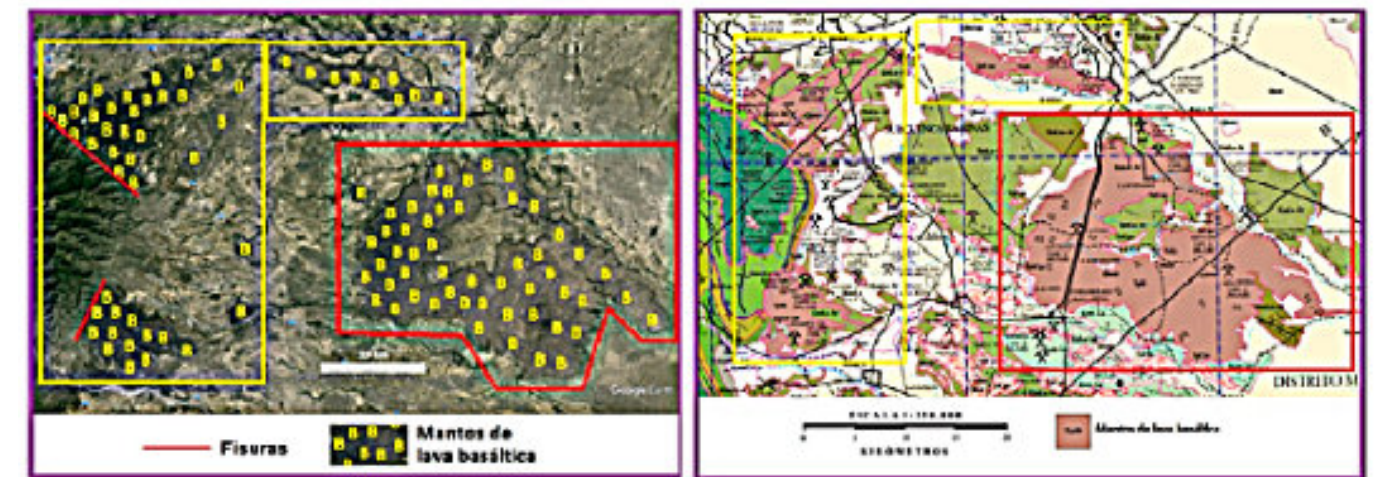


Figura 2.- Imagen satelital y de carta geológica 1:250000 de la cuenca de Sabinas con la distribución de los afloramientos de los basaltos del campo volcánico las Esperanzas-Kakanapo, con su parte occidental encuadrada en amarillo (Las Esperanzas) y su parte oriental encuadrada en rojo (Kakanapo).

Los mantos de lava basáltica en algunas áreas pudieran estar recubiertos parcialmente por depósitos relativamente potentes de conglomerados del Pleistoceno-Holoceno y depósitos de sedimentos coluviales y aluviales del Holoceno (Figura. 2). En numerosas localidades es posible observar los mantos de lava basáltica yaciendo sobre los conglomerados de la Formación Sabinas (Tpl) pero en la mayoría de los casos yacen discordantemente sobre las rocas que componen la secuencia de las formaciones terrígenas de la cuenca carbonífera de Sabinas (Kc-Km).

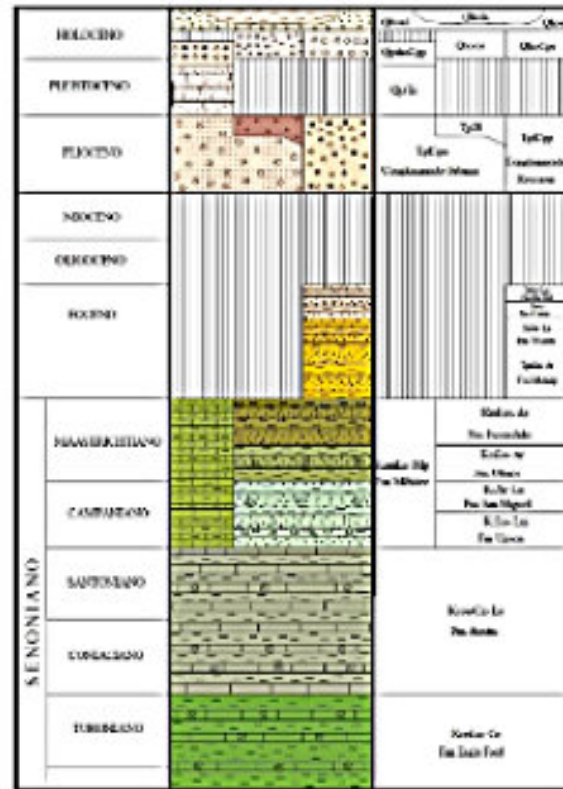


Figura 3.- Columna estratigráfica de la cuenca de Sabinas.

Metodología.

Para llevar a cabo la presente investigación fue necesario realizar las siguientes tareas:

1. Se ejecutaron los correspondientes trabajos de campo con la finalidad de documentar, describir y tomar las muestras representativas de los mantos de lava basáltica.
2. Se seleccionaron seis muestras representativas de basaltos, a las cuales se le determinaron los contenidos de los elementos mayores, oligoelementos y elementos trazas mediante el empleo de un microanalizador de fluorescencia de rayos X marca Olympus INNOV.X, modelo DPO-2000-CC.
3. Se prepararon láminas delgadas de muestras representativas de basaltos, las cuales fueron estudiadas con ayuda del microscopio petrográfico LEICA DM 2500 P, con cámara digital firewire y sistema de imagen QWIN, fw 4000 incorporados, lo que permitió conocer con mayor profundidad las características mineralógicas y texturales de los basaltos estudiados, tomándose numerosas microfotografías que permitieron documentar gráficamente las características observadas.

Resultados

Trabajos de campo

Mediante los trabajos de campo realizados se pudo comprobar la extensión y potencia de los afloramientos de lavas basálticas en diferentes localidades, además de sus relaciones con otras unidades geológicas. Se comprobó que los mantos de lava basáltica se caracterizan por presentar una pequeña potencia, que en la mayoría de los afloramientos observados no supera los dos metros (Fig. 4 y Fig. 5); sólo ocasionalmente en las proximidades de algunas fisuras documentadas en la sierra de Santa Rosa, cerca de la localidad de Múzquiz, los espesores superan los 10 metros (Figura. 6).

La edad relativa de los mantos de basaltos resulta muy evidente, de acuerdo con sus relaciones de campo, probablemente parte alta del Plioceno al Pleistoceno, ya que yacen discordantemente sobre los conglomerados de la Fm. Sabinas, supuestamente del Plioceno (Fig. 4 y Fig. 5).



Figura 4.- Afloramiento artificial de los basaltos del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo yaciendo sobre los conglomerados de la Formación Sabinas, la que yace discordantemente sobre las rocas de la secuencia sedimentaria terrígena cretácica.



Figura 5.- Basaltos del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo yaciendo discordantemente sobre los conglomerados de la Formación Sabinas. Al parecer el flujo de lava basáltica relleno un paleocauce fluvial.

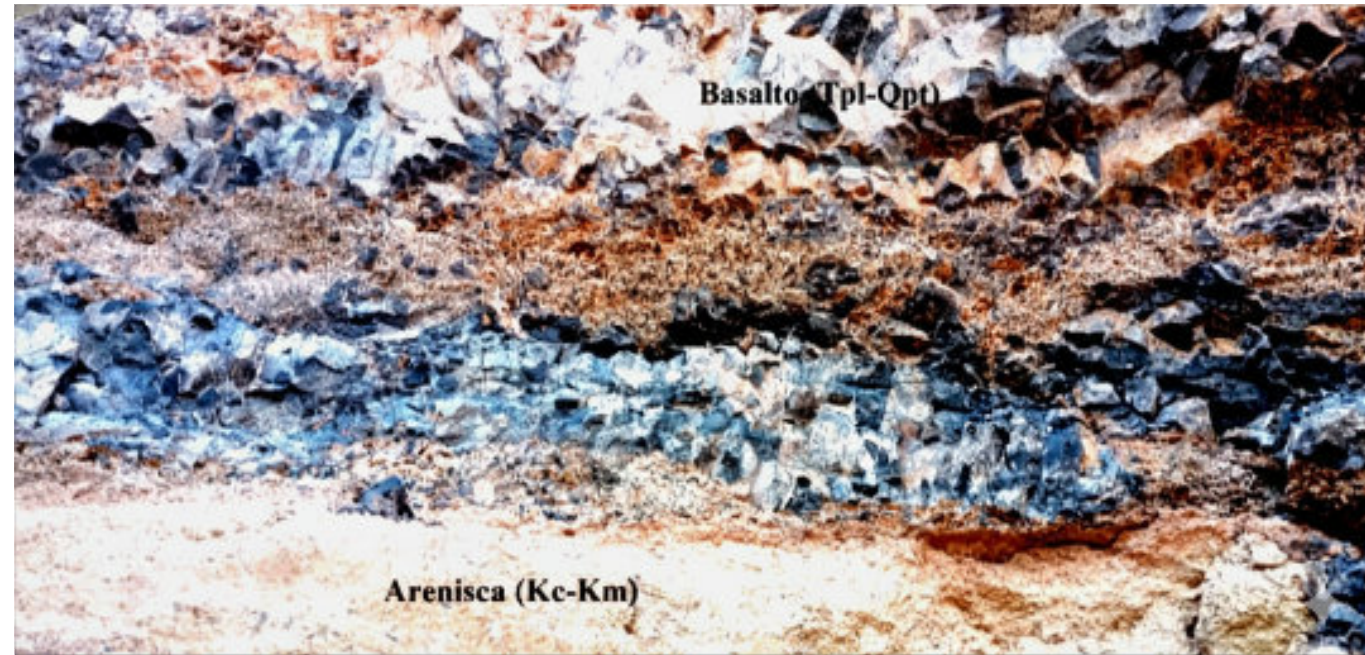


Figura 6.- Afloramiento artificial de un manto basáltico del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo yaciendo discordantemente sobre areniscas de la secuencia terrígena del Cretácico que hospeda los depósitos de carbón en la cuenca de Sabinas.

Con frecuencia, en los afloramientos de los mantos de lavas se observan distintos tipos estructurales de basaltos, que pueden variar dentro de un mismo manto desde sectores de estructura masiva en su parte central hasta sectores marginales de estructura vesicular (Fig. 1A, 1B y 1C). Los basaltos con estructura vesicular suelen asociarse espacialmente con afloramientos que pudiera considerarse como una especie de brechas freatomagmática, que pudiera ser el resultado de explosiones originadas cuando la lava basáltica entra en contacto con las aguas freáticas o superficiales. Estas brechas están constituidas por bloques de basalto de diferentes dimensiones cementados por calcita (Fig.7D).

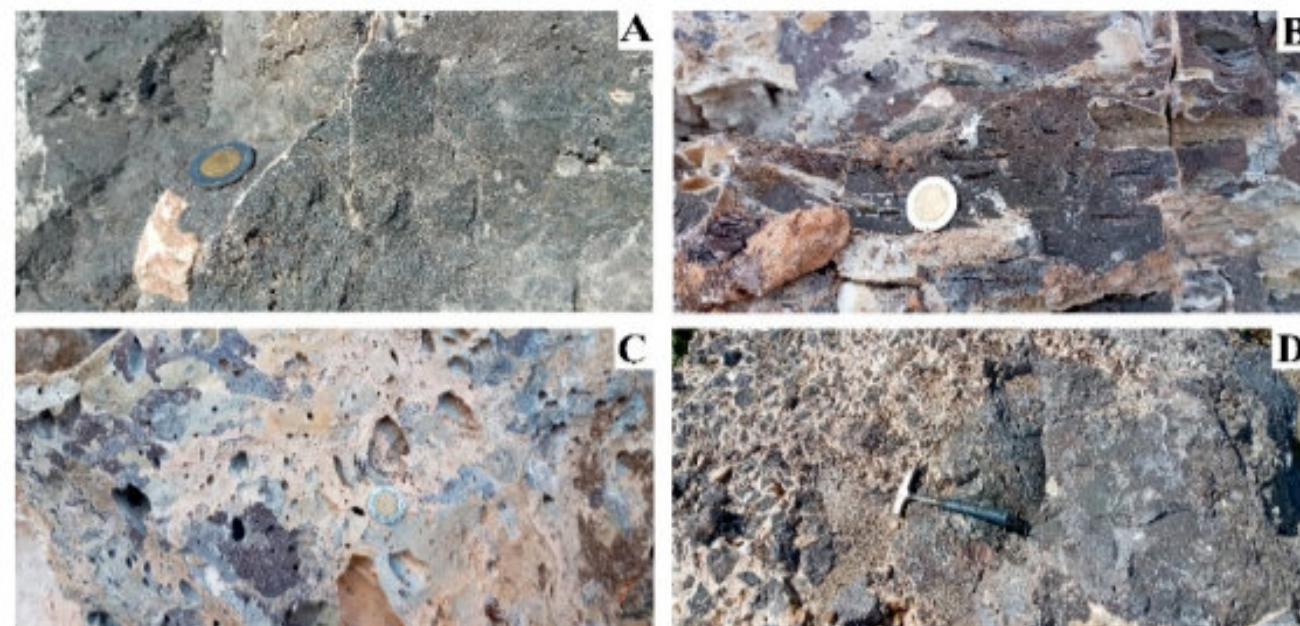


Figura 7.- Características texturales de los basaltos en los mantos de lavas.

Comúnmente en los afloramientos naturales y artificiales los basaltos se presentan poco o nada alterados a causa de la meteorización, sólo con presencia de alguna carbonatización secundaria en las fracturas o cementando supuestas brechas freáticas, pero en ellos resulta muy evidente la iddingsitización del olivino al ser observados con ayuda de la lupa de 16 aumentos e incluso a simple vista.

Determinación de la composición química

Con ayuda del microanalizador de Fluorescencia de Rayos X, se analizaron un total de seis muestras de basalto previamente seleccionadas de los afloramientos documentados, descritos y muestreados, determinándose en cada muestra los contenidos 11 elementos mayores y oligoelementos (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, P, Mn y Sr) cuyos valores expresados en óxidos aparecen reflejados en la tabla 1, así como los contenidos de 10 elementos en trazas (V, Cr, Ni, Zr, Zn, Cu, Th, Y, Rb y Pb) cuyos contenidos aparecen en la Tabla 2.

Tabla 1.- Componentes mayores expresados en óxidos de los basaltos Las Esperanzas-Kakanapo, en % en peso.

	1	2	3	4	5	6	Promedio
SiO ₂	47.8 4	48.0 5	48.89	47.0 7	47.3 3	46.8 7	47.67
Al ₂ O ₃	14.7	14.3 1	15.22	14.5 3	15.5	14.6 1	14.81
Fe ₂ O ₃	11.0 4	11.3 5	11.15	11.0 9	11.1 9	11.4 8	11.21
CaO	9.86	9.76	8.12	10.0 2	9.64	9.85	9.54
MgO	8.13	7.15	8.05	9.43	7.82	8.51	8.18
Na ₂ O	3.55	3.33	3.9	3.5	3.82	4.51	3.76
K ₂ O	1.4	1.45	1.5	1.3	1.3	1.2	1.35
TiO ₂	1.7	1.8	1.7	1.65	1.7	1.72	1.71
P ₂ O ₅	0.6	0.5	0.58	0.55	0.54	0.52	0.54
MnO	0.15	0.21	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16
SrO	0.09	0.09	0.094	0.08	0.09	0.1	0.09
Sum	99.0	98	99.35	99.3	99.0	99.5	99.06

Estudios petrográficos

El estudio de las láminas delgadas obtenidas de las muestras de basaltos del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo estudiadas con la ayuda del microscopio petrográfico permitió la identificación de la composición mineralógica y las características texturales de los mismos, al tiempo que permitió hacer una valoración de los efectos del proceso de iddingsitización del olivino, obteniéndose numerosas microfotografías que permiten la documentación, descripción e interpretación de todos estos fenómenos cuyos resultados se muestran a continuación.

	1	2	3	4	5	6	Promedio
V	180	200	226	309	297	259	245.1
Cr	216	272	227	181	191	278	227.5
Ni	181	184	195	177	187	204	188
Zr	166	168	163	167	166	164	165.6
Zn	101	105	95	99	109	106	102.5
Cu	34	36	40	35	33	34	35.3
Th	8	6	9	5	6	5	6.5
Y	26	25	24	26	23	25	24.8
Rb	19	16	18	20	16	21	18.3
Pb	8	8	7	5	8	7	7.1
Suma	939	1020	1004	1024	1036	1103	1021

Tabla 2.- Contenidos de algunos elementos en trazas en los basaltos Las Esperanzas-Kakanapo, en ppm.

La microfotografía representada en la Figura 8 corresponde a un basalto con muchas vesículas, constituido por abundantes fenocristales euhedrales y subhedrales de olivino total o parcialmente iddingsitizados, dentro de una matriz holocristalina de plagioclasa, pequeños cristales de olivino, augita (Ti-augita) y minerales opacos. La matriz presenta una textura seriada e intergranular de grano fino a medio con plagioclasa, olivino, augita, algo de calcita y minerales opacos. El olivino de la matriz se presenta en forma de cristales muy pequeños y posibles cristales esqueléticos que hacen pensar en un olivino neoformado, evidentemente posterior al proceso de iddingsitización.

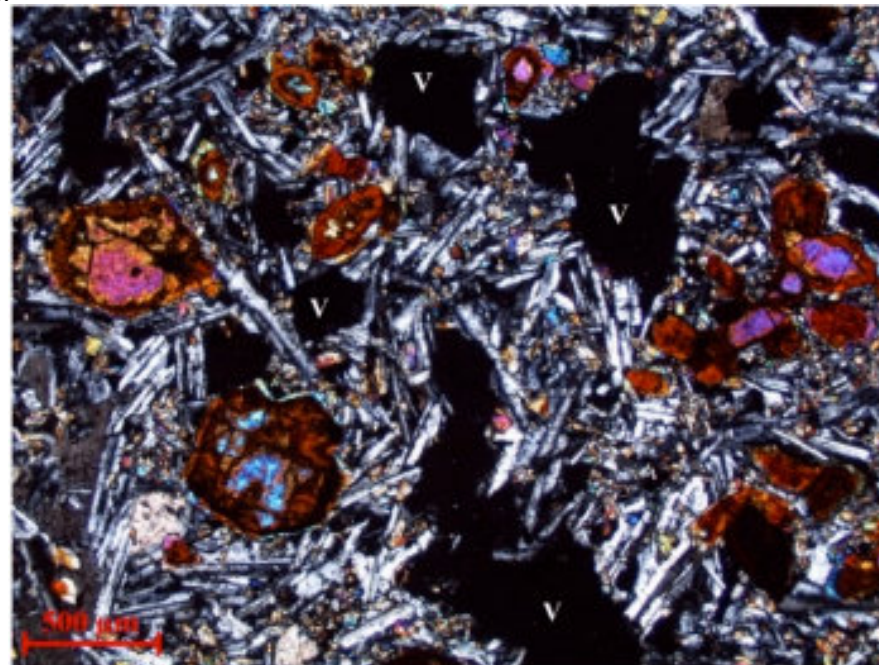


Figura 8.- Microfotografía de basalto con cristales de olivino total o parcialmente iddingsitizados.

La microfotografía representada en la Figura 9 fue obtenida de un basalto con notable presencia de carbonatos (calcita) intersticial, que da la impresión de ser magmático o un pseudomorfo de calcita a partir de un mineral desconocido. Se observan abundantes cristales de olivino euhedrales y subhedrales total o parcialmente iddingsitizados dentro de una matriz de textura seriada e intergranular de grano fino a medio con plagioclasa, calcita, olivino, augita y minerales opacos. El olivino de la matriz se presenta en forma de cristales muy pequeños y posibles cristales esqueléticos que hacen pensar en un olivino neoformado.

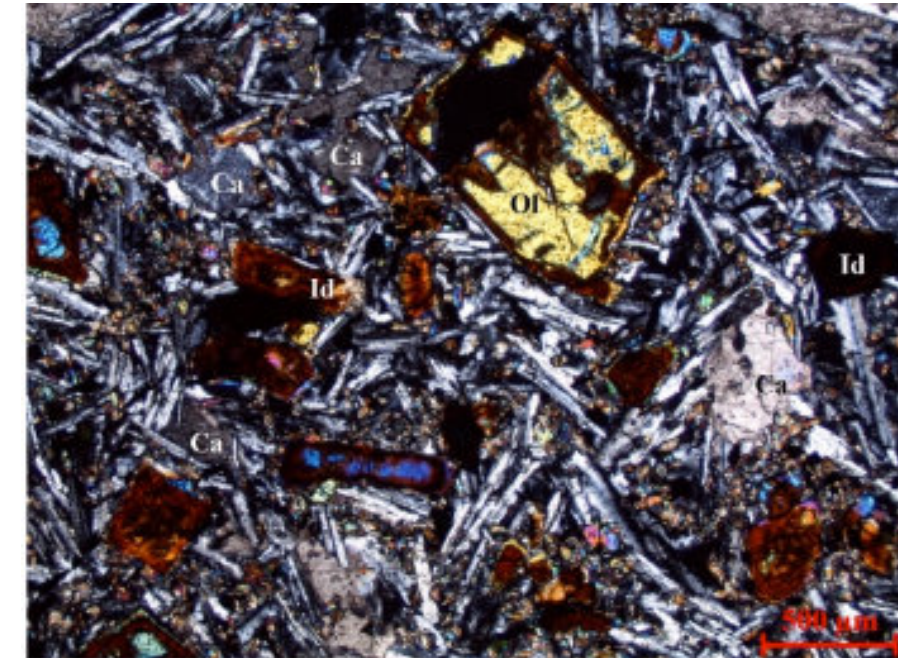


Figura 9.- Microfotografía de basalto con cristales de olivino (Ol) total o parcialmente iddingsitizados dentro de una matriz de plagioclasa, calcita y muy pequeños cristales individuales y cristales esqueléticos de olivino no iddingsitizados.

La microfotografía representada en la Figura 10 corresponde a un basalto con una textura seriada glomeroporfídica con notable presencia de carbonato (calcita). Se observan abundantes cristales de olivino euhedrales y subhedrales total o parcialmente iddingsitizados, dentro de una matriz seriada intergranular de grano fino a medio con plagioclasa, calcita, olivino, augita y minerales opacos. El olivino de la matriz se presenta en forma de cristales muy pequeños y posibles cristales esqueléticos que hacen pensar en un olivino neoformado.

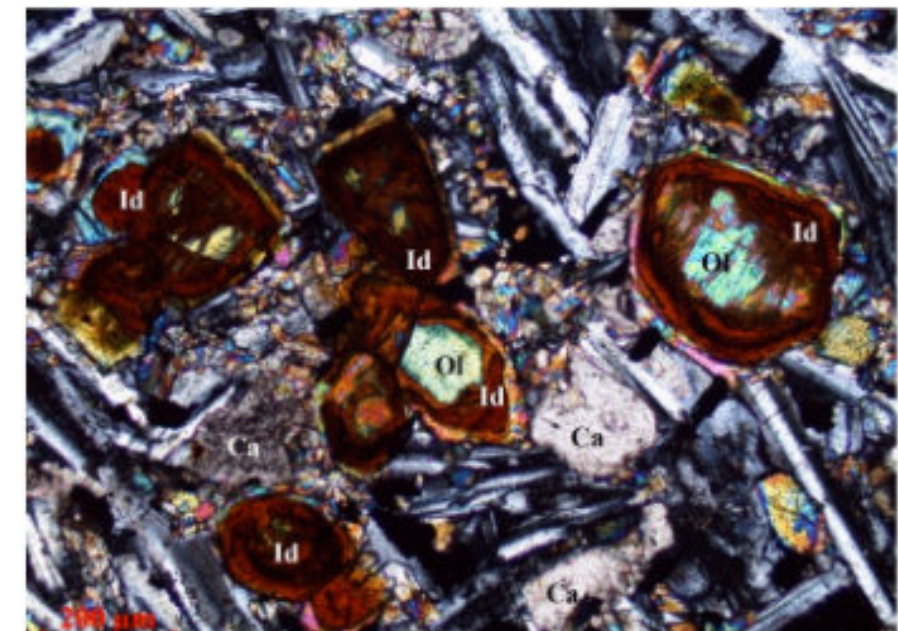


Figura 10.- Cristales euhedrales y subhedrales de olivino presentando diferentes grados de iddingsitización dentro de una matriz de plagioclasa, calcita, muy pequeños cristales de augita y olivino esquelético y en forma de pequeños cristales aislados de neoformación.

La microfotografía representada en la Figura 11 se corresponde a basalto con una textura seriada glomeroporfídica con notable presencia de carbonatos (calcita). Se observan abundantes cristales de olivino euhedrales y subhedrales total o parcialmente iddingsitizados, dentro de una matriz seriada intergranular de grano fino a medio con plagioclasa, calcita, olivino, augita y minerales opacos. El olivino de la matriz se presenta en forma de cristales muy pequeños y posibles cristales esqueléticos que hacen pensar en un olivino neoformado, los cuales también forman orlas alrededor de la iddingsita.

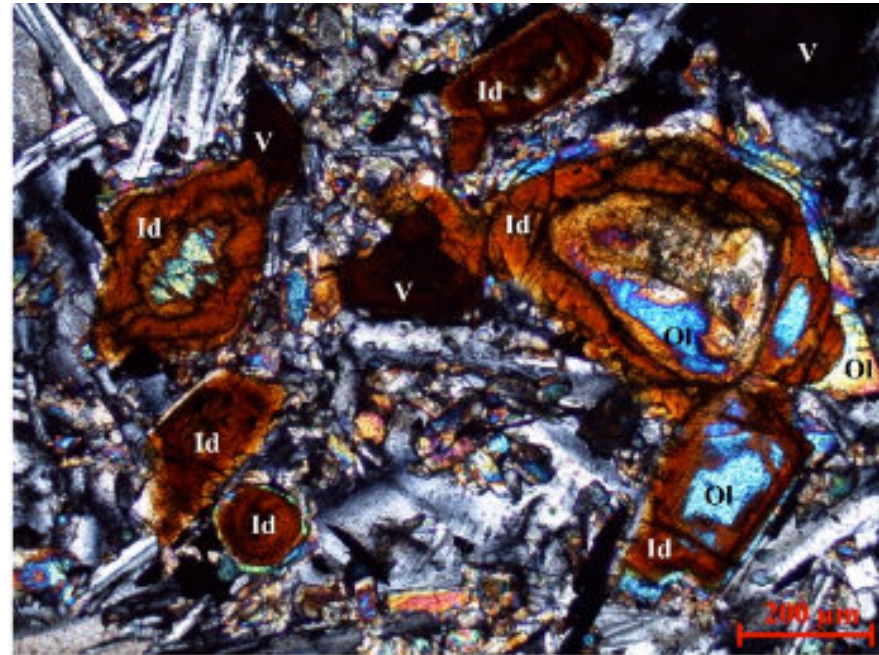


Figura 11.- Cristales euhedrales y subhedrales de olivino presentando diferentes grados de iddingsitización dentro de una matriz de plagioclasa, muy pequeños cristales de augita y olivino esquelético y en forma de pequeños cristales aislados neoformados.

En las microfotografías de la Figura 12 se puede observar un agregado glomeroporfídico de cristales de olivino total o parcialmente iddingsitizados. Se aprecia muy bien el carácter zonado de los pseudomorfos de iddingsita, en correspondencia con el grado de iddingsitización.

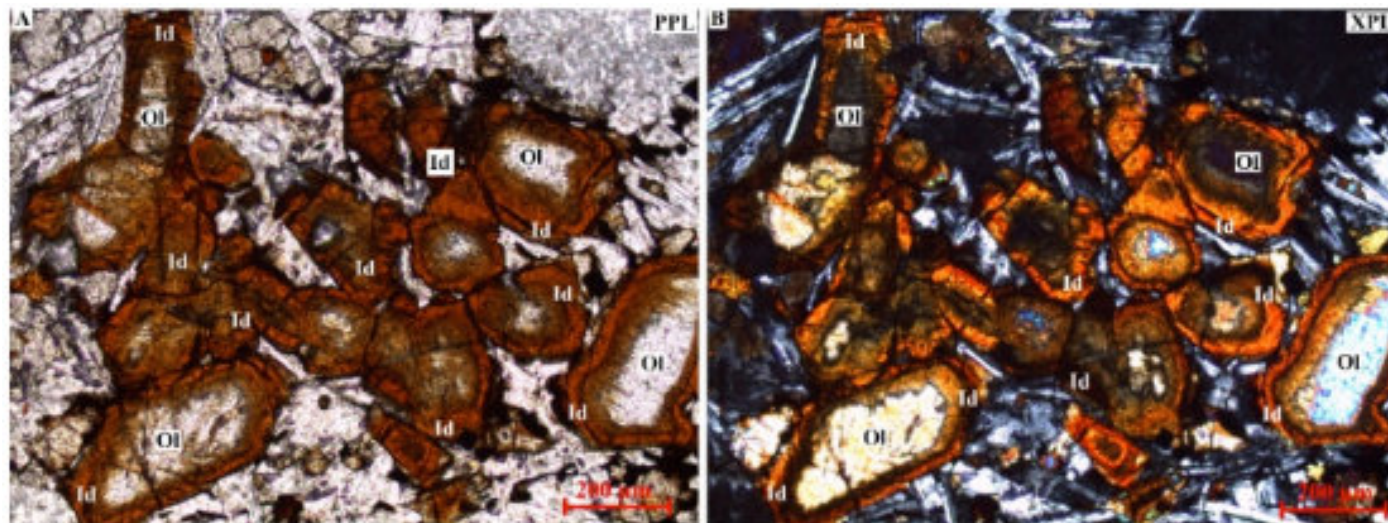


Figura 12.- Agregado glomeroporfídico de cristales de olivino total y parcialmente transformados en pseudomorfos de iddingsita.

En la microfotografía de la Figura 13 se observa un agregado glomeroporfídico de cristales de olivino casi totalmente iddingsitizados, con sólo algunos relictos de olivino en su interior. Se observa una acentuada zonación de los diferentes productos del proceso de iddingsitización, con relictos de olivino hacia la parte central mostrando los efectos de una iddingsitización muy incipiente.

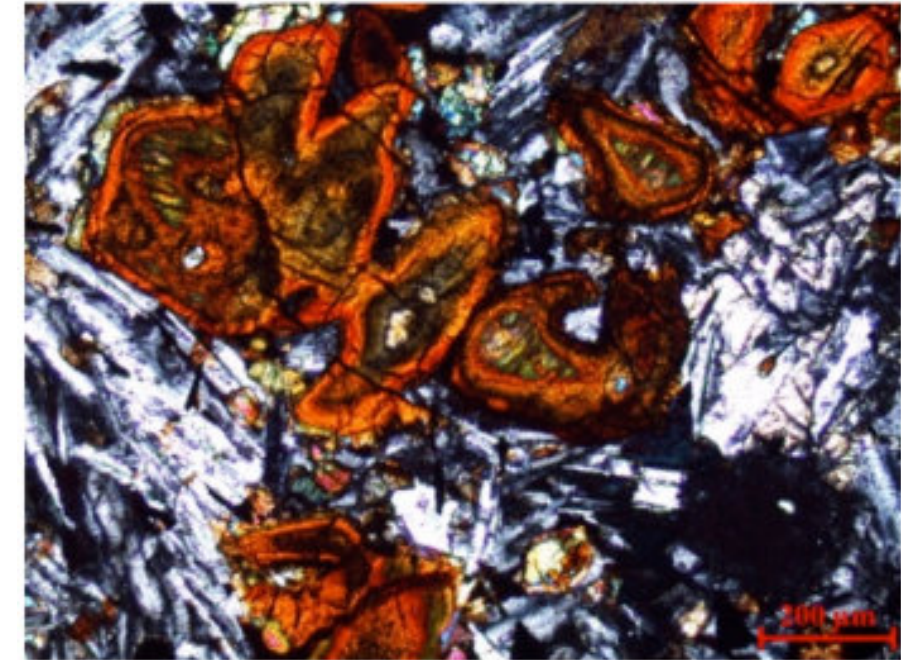


Figura 13.- Agregado glomeroporfídico de cristales de olivino notablemente transformados a pseudomorfos de iddingsita.

En las microfotografías de la Figura 14 se puede observar agregados glomeroporfídicos de cristales de olivino, que en los agregados de cristales más pequeños se encuentran total o casi totalmente iddingsitizados, mientras que en los agregados de cristales más grandes y euhedrales la iddingsitización es sólo parcial y prácticamente limitada a sus bordes, al parecer incipiente.

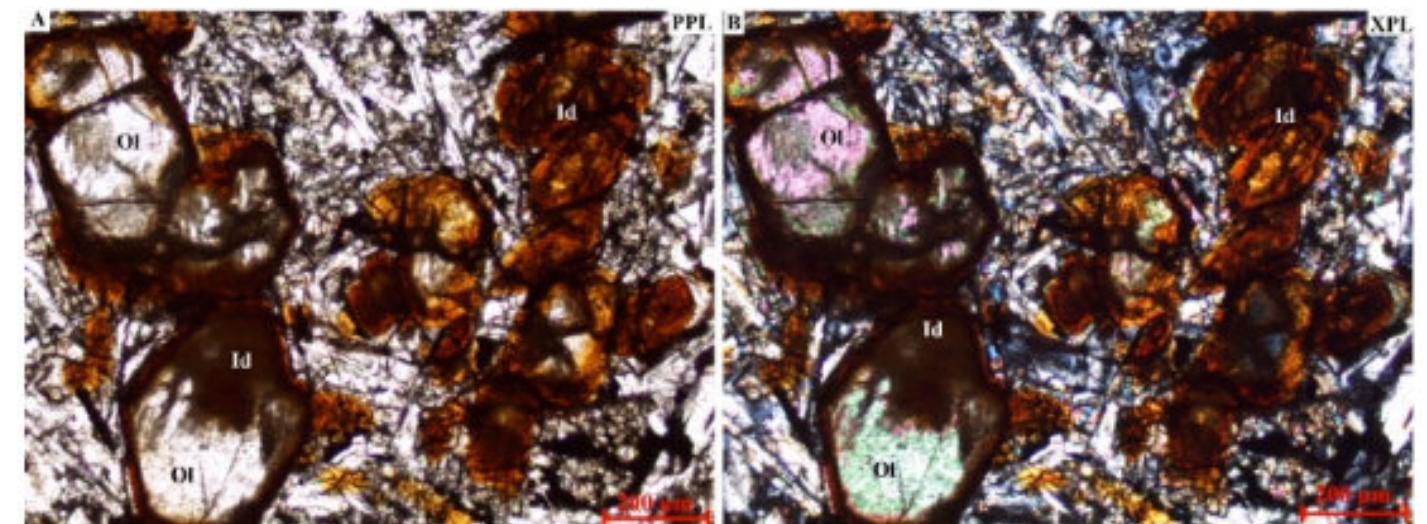


Figura 14.- Agregados glomeroporfídicos de cristales de olivino total o parcialmente iddingsitizados.

La fotografía de la Figura 15 muestra pseudomorfos de iddingsita a partir de olivino en cuyos bordes se aprecia muy nítidamente orlas de pequeños cristales de olivino neoformado; uno de los pseudomorfos de iddingsita se destaca por su acentuado clivaje en dos direcciones y también se destaca la muy evidente textura traquitoidea de la matriz de la lava basáltica en la correspondiente muestra de basalto.

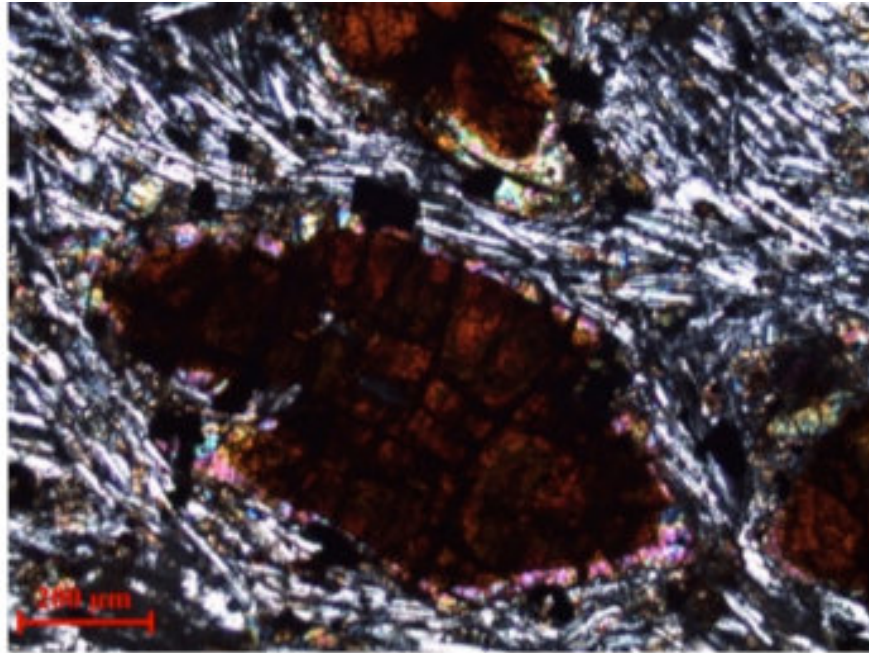


Figura 15.- Pseudomorfo de Iddingsita a partir de olivino rodeado por una orla de pequeños cristales de olivino, dentro de una matriz traquitoidea.

La fotografía de la Figura 16 muestra pseudomorfos de iddingsita a partir de fenocristales de olivino aparentemente corroídos y agolfados, con relictos de olivino en su interior y bordes en los que se aprecia muy nítidamente orlas de pequeños cristales de olivino neoformado, que también rellenan los golfos resultantes de la previa corrosión de los cristales del olivino temprano. En esta microfotografía destaca la muy evidente textura traquitoidea de la matriz de la lava basáltica en la correspondiente muestra.

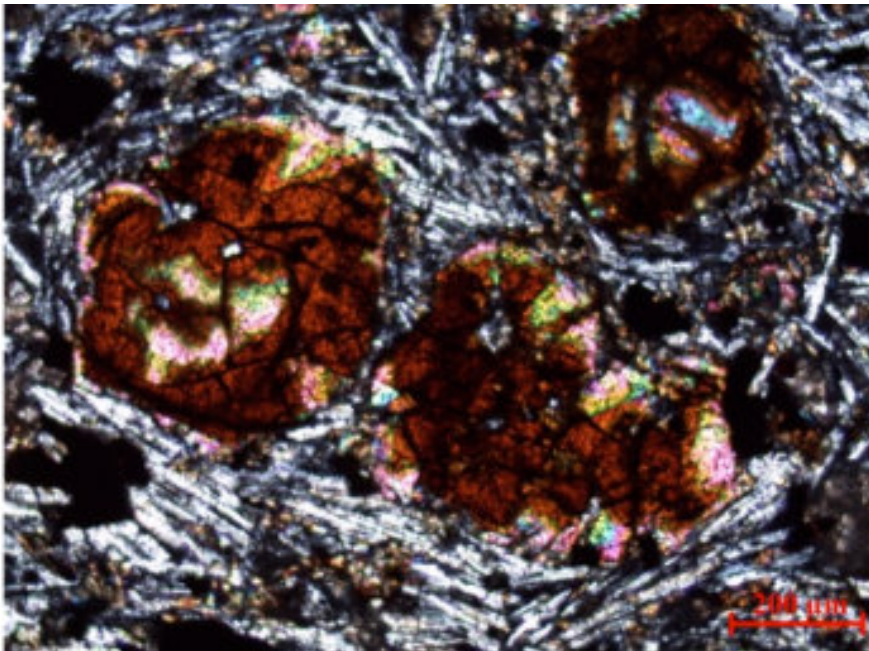


Figura 16.- Microfotografía donde se observan fenocristales de olivino iddingsitizados con orlas y golfos rellenos con pequeños cristales de olivino neoformado, dentro de una matriz con textura traquitoidea.

En la microfotografía mostrada en la Figura 17 se puede observar la presencia de pseudomorfos de iddingsita a partir de olivino coexistiendo con fenocristales de augita (T augita) sin la más mínima evidencia de alteración, mostrando una textura seriada intergranular típica. La presencia de augita inalterada, coexistiendo en el basalto con pseudomorfos de iddingsita a partir de olivino puede servir de criterio para afirmar que el proceso de iddingsitización sólo afecta al olivino.

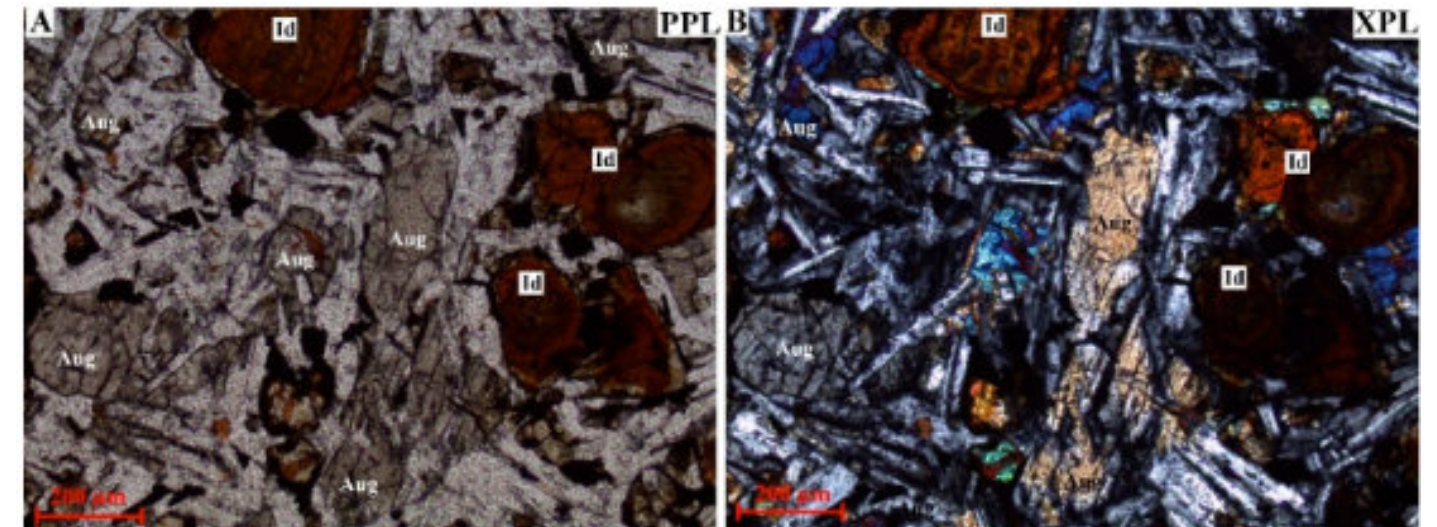


Figura 17.- Pseudomorfos de iddingsita a partir de olivino coexistiendo con augita nada alterada dentro de una matriz de plagioclasa, augita esquelética y minerales opacos.

Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación los mantos basálticos del campo volcánico Las Eperanzas-Kakanapo están representados por diferentes tipos estructurales de basalto dentro de los límites de un mismo manto desde basalto de estructura masiva en su parte central hasta basaltos con estructura vesicular en los bordes superior e inferior (Fig. 1A, 1B y 1C). En las proximidades de los afloramientos con mayor presencia de los basaltos con estructura vesicular también suelen observarse la presencia de supuestas brechas freatomagmáticas (Figura.7D).

Los datos de la distribución de los elementos mayores, oligoelementos y elementos trazas en las muestras de los basaltos del campo volcánico Las Esperanzas-Kakanapo obtenidos con la ayuda del microanalizador de fluorescencia de rayos X concuerdan, en lo fundamental, con la distribución de estos elementos en los basaltos olivínicos estudiados en otras localidades de México y de otros países.

Desde el punto de vista microscópico los basaltos de los diferentes mantos son muy similares en cuanto a texturas y composición mineralógica, caracterizándose por presentar texturas que varían desde porfídicas a glomeroporfídicas con cristales euhedrales y subhedrales de olivino total o parcialmente iddingsitizados de dimensiones submilimétricas, que componen un alto por ciento de la composición mineralógica de estas rocas, a groso modo algo más del 10 % (Fig. 8 y Fig. 9). Los microfenocristales de olivino se encuentran dentro de una matriz constituida por cristales subhedrales de plagioclasa también de longitudes submilimétricas, fenocristales subhedrales de augita de habito columnar y muy pequeños cristales de olivino y augita. Con frecuencia se observa la presencia de calcita interticial que parece ser magmática o pseudomorfos de calcita a partir de un mineral desconocido (Fig. 9 y Fig. 10). Con frecuencia se observan basaltos con una acentuada textura traquitoidea (Fig. 15 y Fig. 16). La matriz holocristalina intergranular y está constituida por un agregado afieltrado de microlitos de plagioclasa cuyos intersticios se encuentran ocupados por augita, minerales opacos y

olivino. Los cristales de olivino en fenocristales se encuentran reemplazados total o parcialmente por iddingsita, al parecer predominantemente de alta temperatura, mientras que los pequeños cristales de la matriz no presentan indicios de iddingsitización.

Las características de los pseudomorfos de iddingsita a partir de olivino indican que la misma es de alta temperatura y resultado de un proceso deutérico relacionados con fluidos derivados de la propia evolución del magma basáltico. Los argumentos a favor de un proceso de iddingsitización deutérico de alta temperatura son los siguientes:

- 1.- El color predominantemente marrón anaranjado a rojo rubí intenso predominante en los pseudomorfos de iddingsita, como se puede observar en todas las microfotografías mostradas en el presente trabajo. Estos colores son propios de la iddingsita formada por procesos deutéricos o mágmáticos tardíos.
- 2.- El carácter zonado de los pseudomorfos de iddingsita, indicativos de un proceso de alteración centrípeta del olivino (Fig. 12 y Fig. 13).
- 3.- La presencia de olivino neoformado inalterados constituyendo orlas alrededor de los pseudomorfos de iddingsita y dispersos en la matriz (Fig 10, Fig. 11, Fig. 15 y Fig. 16).
- 4.- Ausencia de evidencias que indiquen los efectos de meteorización significativa en los basaltos, lo que pudieran tomarse como argumento acerca de la formación de iddingsita de baja temperatura, ya que el único mineral evidentemente alterado es el olivino, al tiempo que otro ferromagnesiano como la augita y las plagioclasas no presentan el más mínimo signo de alteración a causa de la meteorización, como se puede apreciar particularmente en las microfotografías de la Figura 17.

Conclusiones

Un rasgo significativamente distintivo de los basaltos del campo volcánico Las Esperanzas- Kakanapo esta dado por la extraordinaria iddingsitización de prácticamente todos sus microfenocristales de olivino, supuestamente de origen magmático temprano, que fueron transformados total o parcialmente en pseudomorfos de iddingsita.

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran la iddingsita, por sus características y relaciones con otras fases minerales, es de alta temperatura, sin que existan evidencias que apoyen la existencia de iddingsita de baja temperatura o asociada a procesos de meteorización.

Una característica distintiva de los basaltos estudiados en la presente investigación es la presencia de calcita intersticial, a veces en cantidades significativas, fenómeno que no es común en la mayoría de los basaltos estudiado en otras localidades. Esta calcita no parece ser hidrotermal o asociada a procesos de meteorización, comunes en los basaltos, sino más bien de origen magmático y originado como una fase mineral tardía a partir de líquidos residuales enriquecidos en volátiles, particularmente H₂O y CO₂, lo que concuerda con la formación y presencia de iddingsita de alta temperatura en los basaltos estudiados.

Bibliografía

- Aranda-Gómez, J.J.**, Luhr, J.F., Housh, T.B., Connor, C.B., Becker, T., Henry, C.D., 2003, Synextensional Plio-Pleistocene eruptive activity in the Camargo volcanic field, Chihuahua, México: Geological Society of America Bulletin, 115, 298–313. **Aranda-Gómez, J.J.**, Luhr, J.F., Housh, T., Valdez-Moreno, G., Chávez-Cabello, G., 2005, El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico tardío en el centro y norte de México: una revisión: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57, 187–225.
- Aranda-Gómez, J.J.**, Luhr, J.F., Housh, T., Valdez-Moreno, G., Chávez-Cabello, G., 2007, Late-cenozoic intraplate-type volcanism in central and northern México: a review, in **Alaniz-Álvarez, S.A.**, Nieto-Samaniego, A.F. (eds.), Geology of Mexico: Celebrating the centenary of the Geological Society of Mexico: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 422, 93–128.
- Bernardi, M.** I., Bertotto, G. W., Ponce, A. D., 2016, Estructuras de segregación vesiculadas alojadas en coladas basálticas pahoehoe de Payenia, Provincia de Mendoza, Argentina: Aspectos morfogénéticos y petrográficos: Revista de la Asociación Geológica Argentina 73 (1): 50 – 63.

Ewards A. B., The formation of iddingsite. University of Melbourne, Australia. http://www.minsocam.org/ammin/AM23/AM23_277.pdf

Henry, C.D., Aranda-Gómez, J.J., 1992, The real southern basin and range: mid-to late Cenozoic extension in Mexico: Geology, 20, 701–704.

Espinosa, J., Montiel-Escobar, J. E., Bustos-Moreno, M. A., Carta Geológica a escala 1:250000 (G14-1) del cuadrante Nueva Rosita, Estado de Coahuila, 2008: Segunda Edición, Servicio Geológico Mexicano.

Valdez-Moreno, G., 2001, Geoquímica y petrología de los campos volcánicos Las Esperanzas y Ocampo, Coahuila, México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 104 p.

Antonio Rodríguez Vega.

Ingeniero Geólogo, Doctor en Ciencias Geológicas, egresado del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, hoy Universidad Antonio Núñez Jiménez de Moa, Cuba en 1977, donde también obtuvo el grado de doctor en 1995. Se desempeñó como profesor universitario desde 1977 hasta 2008 en las universidades cubanas de Pinar del Río y Moa, alcanzando el título de Profesor Titular; durante esta etapa colaboró como profesor en la Universidad Nacional de Angola, la Universidad Nacional de Loja y la Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial. Desde 2010 desarrolla su actividad profesional en México, donde ha contribuido en la confección de numerosas cartas geológica-mineras a escala 1: 50000 en varios estados de este país y desde hace 12 años se desempeña como Profesor Titular-Investigador de la Universidad Autónoma de Coahuila y forma parte del Sistema de Nacional de Investigadores (SIN) de México y posee la categoría de Investigador Emérito del Estado de Coahuila. Durante los últimos 12 años se ha enfocado el estudio de los depósitos de Tierras Raras y otros metales raros asociados a los complejos magmáticos peralcalinos agpaíticos en la región noroeste del estado de Coahuila, cuyos principales resultados se han presentado en eventos científicos internacionales y publicado en revistas indexadas.

Correos electrónicos y teléfono: arvega48@yahoo.com ; avega@uadec.edu.mx

LA GEOLOGÍA EN EL DISEÑO DE ETIQUETAS DE VINO: ESTILOS, TEMAS Y SIGNIFICADO

Jesús S. PORRAS MORENO

Consultor Independiente (porrasjs@yahoo.com)



RESUMEN

En los últimos años, la geología ha adquirido un protagonismo inédito en el discurso visual y comercial del vino. Cada vez más bodegas incorporan en sus etiquetas motivos geológicos para expresar la singularidad del terroir y conectar el vino con la historia geológica y materiales de la Tierra.

El vínculo entre geología y vino ha sido históricamente reconocido en el ámbito científico a través del concepto de terroir, que asocia las características del suelo y del subsuelo con el sabor, la textura y la identidad del producto. Sin embargo, en las últimas décadas este vínculo ha trascendido el campo de la enología para adquirir una dimensión estética y simbólica, visible en el diseño de etiquetas que incorporan elementos propios del imaginario geológico: volcanes, pliegues, estratos, mapas, minerales, rocas y fósiles, entre muchos otros. Hoy, la geología no solo explica el origen del vino, sino que también inspira su representación visual, transformándose en un lenguaje de comunicación entre la ciencia, el diseño y la cultura del vino.

Estas representaciones gráficas no son solo decorativas. Funcionan como un discurso visual que traduce la complejidad del paisaje en signos legibles, reforzando la percepción del vino como producto de una geografía específica y de una rica y profunda historia geológica. Al integrar motivos geológicos, las bodegas comunican autenticidad, ciencia y origen, al mismo tiempo que proyectan una identidad de marca al territorio.

En este estudio se analiza el uso de la geología como recurso visual y narrativo en las etiquetas de vino, entendiendo la etiqueta no solo como instrumento comercial, sino como un espacio de comunicación patrimonial y científica. A través del examen de ejemplos

de distintas regiones vitivinícolas del mundo, se busca comprender cómo la estética geológica se ha convertido en un lenguaje simbólico que relaciona conocimiento, territorio y cultura. Se identifican siete grandes categorías iconográficas: Paleontología, Petrología y Minerales, Procesos y Ambientes Geológicos, Geodinámica y Estructura de la Tierra, Clima y Fenómenos Atmosféricos, Representación, Ciencia y Profesión y Dimensión Simbólica, Cósmica y Alegórica, que reúnen más de 480 motivos geológicos diferentes.

GEOLOGÍA y TERROIR

El terroir se ha consolidado como un concepto central en la vitivinicultura, entendiendo el vino como resultado de la interacción entre geología, clima, relieve y prácticas humanas (Van Leeuwen & Seguin, 2006; Wilson, 1998, 2001). Desde una perspectiva geocultural, la composición mineral, la textura del sustrato y la topografía se reflejan en atributos sensoriales específicos; de allí que elementos como sílice, caliza o arcilla puedan influir en la expresión del vino (Villier, 2021).

Dunning y Gemmer (2019) indican que la asociación entre vino y territorio es antigua y estructural dentro de la cultura vitivinícola. Resaltan que desde los tiempos romanos se reconoce que el lugar de origen influye en la calidad y singularidad del vino, lo que llevó al desarrollo de denominaciones geográficas precisas y normativas, especialmente en países con larga tradición vinícola.

En este marco, la geología constituye el fundamento del terroir. Según Wilson (1998), fija los límites y posibilidades del viñedo y explica gran parte de las diferencias entre regiones. Las referencias geológicas en las etiquetas, aunque secundarias, contribuyen a comunicar este vínculo entre tierra e identidad, destacando el origen y el carácter del viñedo.

LA ETIQUETA COMO MEDIO VISUAL Y COMUNICATIVO

Las etiquetas surgieron como respuesta a la necesidad de identificar y autenticar productos. Desde las antiguas civilizaciones mediterráneas, donde se marcaban ánforas y recipientes con signos de procedencia, hasta los emblemas gremiales medievales, su función principal fue comunicar origen y garantizar calidad (Fernández Portela, 2019). Con la imprenta y la Revolución Industrial, la etiqueta impresa adquirió un papel informativo y estético, consolidándose en el siglo XX gracias a los avances tecnológicos y a la aparición de los materiales autoadhesivos.

En la cultura contemporánea, la etiqueta constituye uno de los soportes visuales más eficaces para la comunicación de identidad, valor y origen. Lejos de ser un simple contenedor de información técnica o normativa, la etiqueta se configura como elemento gráfico, un medio visual condensado donde convergen lenguajes estéticos, narrativos y simbólicos. En ella, el texto, la imagen, el color y la tipografía interactúan como elementos de un sistema de signos destinado a construir sentido y generar una experiencia perceptiva. De este modo, la etiqueta ha evolucionado de simple identificador a una poderosa herramienta de comunicación, mercadeo y construcción cultural.

En el ámbito vitivinícola, la etiqueta adquirió una dimensión cultural y comunicacional singular. Más allá de su función informativa de indicar origen, variedad o envejecimiento, se transformó en un medio visual que expresa identidad territorial y valores simbólicos del vino. A lo largo del siglo XX, el diseño de etiquetas evolucionó desde modelos descriptivos hacia composiciones estéticas que integran elementos gráficos de todo tipo, incluyendo topográficos o geológicos, vinculando muchas veces la imagen del producto con su paisaje de origen.

Hoy en día, las etiquetas se diseñan con alta calidad visual y con criterios de marketing que buscan optimizar el posicionamiento de marca, estimular la identificación del consumidor y reforzar la memoria del producto.

Constituyen un soporte esencial para la descripción del terroir, donde confluyen comunicación, arte y ciencia.

LAS ETIQUETAS GEOLÓGICAS EN EL VINO

Entre las diversas estrategias visuales utilizadas en el diseño vitivinícola, las etiquetas de inspiración geológica destacan por su capacidad para materializar el discurso del

terroir y comunicar la relación entre el vino y su suelo de origen. Estas etiquetas incorporan mapas, cortes estratigráficos, perfiles del terreno, fósiles o representaciones mineralógicas que aluden directamente a la base geológica del paisaje vitícola. Las etiquetas son atractivas, originales, creativas, pero a la vez sencillas y sobrias.

Este tipo de diseño cumple una doble función. Traducen el conocimiento científico en lenguaje visual, haciendo visible la estructura del terreno o subsuelo y los procesos que configuran el vino. A nivel simbólico, la geología actúa como marco de autenticidad y temporalidad, vinculando la materia del territorio con la identidad del producto. Dunning y Gemmer (2019) destacan que el diseño de etiquetas de vino refleja estrategias culturales y comerciales distintas según el país y el público objetivo. En el segmento de alta gama, prevalece una estética sobria y esencial, donde el nombre del terroir adquiere protagonismo como signo de prestigio y autenticidad.

Villier (2021) señala que las etiquetas de vino pueden incluir referencias geológicas mediante imágenes, ilustraciones nombres, logotipos o textos descriptivos. Un ejemplo es la AOC Languedoc, Grès de Montpellier, donde “grès” alude a piedras y no a arenisca. En esa región, el Domaine de la Perrière elabora el vino “Les Silices”, con un fósil ilustrado en la etiqueta y uvas cultivadas sobre gravas silíceas y calizas fosilíferas de una antigua cantera.

Más allá de su función informativa, buscan generar en el consumidor una percepción positiva, facilitar la interpretación simbólica del origen y promover la recordación del vino como expresión del terroir.

TIPOLOGÍA DE LAS REPRESENTACIONES GEOLÓGICAS EN LAS ETIQUETAS DE VINO. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.

La presencia de motivos geológicos en el diseño vitivinícola puede clasificarse en diferentes categorías iconográficas, según el modo en que representan visualmente el conocimiento del suelo y del territorio. Estas representaciones no solo cumplen una función estética, sino que expresan modos específicos de relatar el origen y materializar el territorio.

El análisis partió de la recopilación de 480 etiquetas de vino que incorporan motivos geológicos en sus diseños. Estos motivos, o nombres, aparecían tanto de forma directa, mediante fósiles, rocas, estructuras, minerales o paisajes,

como de forma indirecta, a través de alegorías, mapas, referencias al tiempo o símbolos ligados a las geociencias.

Dada la diversidad del material, se aplicó un enfoque mixto, combinando el análisis visual con criterios básicos de las ciencias geológicas y de la comunicación. El objetivo no fue establecer un sistema rígido, sino construir una tipología flexible capaz de reconocer patrones comunes y comprender cómo la geología funciona como recurso narrativo y estético dentro del diseño vitivinícola.

En una primera clasificación se identificaron 31 subcategorías, según el tipo de motivo geológico, simbólico o técnico presente en las etiquetas. Estas subcategorías reúnen nombres geológicos (en su mayoría traducidos al español), símbolos, representaciones o alusiones específicas. En el siguiente listado se indica entre paréntesis la cantidad de menciones observadas en cada una de las subcategorías:

1. Fósiles (42): Alveolina (foraminíferos), Amonites, Aves primitivas (Gargantuavis), Belemnites, Bosque petrificado, Braquiópodos, Bivalvos, Caracolas, Celacanto, Conchas marinas, Crinoides, Diatomeas, Dinosaurios (Ampelosaurus, Brontosaurus, Rhabdodon, T-Rex, Variraptor), Dientes de tiburón, Equinoideos, Erizos y estrellas de mar, Fósiles precámbricos, Gastrópodos, Icnofósiles (Cruziana, Spirorhappe), Mamuts, Mastodontes, Megalodón, Megaterio, Nummulites, Nautilus, Ostras, Peces, Plantas fósiles, Plesiosauros, Pterodáctilo, Toxodonte, Triceratops, Trilobites, Tortugas, Turritelas, Velociraptor.

2. Tiempo Geológico (16): Cámbrico, Cretácico, Devónico, Eoceno, Eón, Holoceno, Jurásico, Luteciense, Mesozoico, Mioceno, Oligoceno, Paleozoico, Plioceno, Silúrico, Triásico, Ypresiense.

3. Supercontinentes y Paleo-Océanos (7): Avalonia, Gondwana, Iapetus, Laurentia, Pangea, Tetis, Tierra.

4. Estratigrafía (7): Discordancia, Estratigrafía, Estrato, Formación, Hiato, Stratum, Substrata.

5. Minerales (53): Alabastro, Albita, Almandino, Apatito, Aragonito, Berilo, Biotita, Blenda, Calcedonia, Citrino, Cianita, Cornalina, Crisolito, Cuarzo, Epidoto, Esfena, Espinela, Estaurolita, Galena, Geoda, Granate, Heliodoro, Jaspe, Lapislázuli, Malaquita, Mica, Mineral, Minerales, Morganita, Ojo de tigre, Olivino, Ónix, Oropimente, Ópalo, Opalina, Pedernal (es), Prehnita, Peridoto, Piropo, Piritita, Rodocrosita, Rodonita, Rose Rock, Rosa del Desierto, Selenita, Serpentina, Siderita, Sílice, Sílex, Turmalina, Uvarovita, Yeso.

6. Gemas y Piedras Preciosas (15): Ágata, Ámbar, Amatista, Azabache, Coral, Cristal, Diamante, Diópsido, Esmeralda, Gema, Jade, Perla, Rubí, Turmalina, Zafiro.

7. Elementos Nativos y Minerales Críticos (26): Barita, Cobalto, Cinabrio, Cobre, Cromo, Elementos, Estaño, Grafito, Hierro, Litio, Magnesio, Níquel, Oro, Paladio, Plomo, Platino, Rubidio, Sal, Sílice, Sólido, Tantalio, Telurio, Tierras raras, Titanio, Tungsteno, Zinc.

8. Rocas Ígneas (11): Andesita, Basalto, Dacita, Gabro, Granito, Ignimbrita, Máfico, Obsidiana, Pórfido, Riolita, Xenolito.

9. Rocas Sedimentarias (15): Arenisca, Arkosa, Brecha, Caliza, Creta (Chalk), Conglomerado, Coquina, Dolomita, Grauvaca, Grès, Limolita, Lutita, Margas, Micrita, Travertino.

10. Rocas Metamórficas (13): Anfibolita, Cuarcita, Esquisto, Filita, Gneis, Hornfels, Metamórfico (a), Migmatita, Orto, Ortogneis, Pizarra, Protolito.

11. Piedras / Stones (5): Boulder, Dique, Piedra, Rock, Stone.

12. Volcanes (27): Aa Lava, Basalto, Bomba volcánica, Caldera, Ceniza, Erupción, Escoria (Cinder), Filón, Fusión, Ígneo, Ignio, Ignimbrita, Lahar, Lapilli, Lava, Maar, Magma, Nuée ardente, Pahoehoe, Piro, Piroclástico, Toba, Traquita, Volcán, Volcánico, Vulcano, Vulcanus

13. Ambientes Sedimentarios (28): Abisal, Arrecife, Bahía, Barra de arena, Costa, Delta, Desierto, Duna (s), Dunita, Fiordo, Flysch, Glaciar, Isla, Istmo, Lago, Laguna, Línea de costa, Mar, Marea, Médanos, Morrena, Oasis, Océano, Oceánico, Olas, Pampa, Planicie, Playa.

14. Sedimentos (15): Arena, Arcilla, Barros, Caliche, Cantos, Granza, Grava, Limo, Lodo, Loess, Piedras, Rocas, Sedimentario, Tierra, Tierras Raras.

15. Terrenos y Suelos (11): Árido, Arenero, Calcáreo, Granítico, Laterita, Loam (Franco), Pedregal, Pedregoso, Peñascal, Petrosus, Sapolito

16. Geomorfología y Relieve (23): Abismo, Acantilados, Avalancha, Barranca, Cabo, Cliff, Crestas, Deslizamiento, Escarpa, Landslide, Mesa, Morro, Península, Piedemonte, Plateau, Relieve, Ridge, Riscos, Roche moutonnée, Rockslide, Talud, Terrazas, Topografía,

17. Montañas (10): Cerros, Cimas, Cordilleras, Cumbres, Ladera, Lomas, Montañas, Orogenia, Picos, Ranges.

18. Quebradas y Valles (3): Barrancas, Quebradas, Valles.

19. Cuevas y Cavernas (6): Cavernas, Cuevas, Dolina, Estalactita, Estalagmita, Karst.

20. Fluvial / Aluvial / Deltas (16): Abanico aluvial, Aluvión, Aluvional, Arroyo, Bedrock, Canal, Cascadas, Delta, Levee,

Meandro, Napas, Planicie aluvial, Ribera, Río, Terrazas, Tributario.

21. Lagos y Lagunas (3): Lago, Lagos, Laguna.

22. Hidrotermales (3): Artesiano, Géiseres, Manantiales.

23. Geología Estructural (35): Alóctono, Batolito, Continental Divide, Cuenca, Domo, En echelon, Epicentro, Estructura, Fallas, Falla (línea de), Falla de San Andrés, Folded, Folding, Fractura, Graben, Grieta, Horst, Hot Spot, Limbo, Manto, Maremoto, Melange, Monoclinal, Orogenia, Range, Rift, Sinclinal, Subducción, Sismo, Temblor, Terremoto, Tecto, Tectónica, Tsunami, Uplift

24. Sísmica (3): Dinamita, Resonancia, Sísmica.

25. Geología Económica, Energía (12): Antracita, Brea, Carbón, Eólico, Lignito, Mina, Minas de carbón, Petroco, Petrolette, Petrolero, Reservorio, Roca madre.

26. Clima (15): Alisio, Anticiclón, Brisa, Bruma, Ciclón, Clima (Weather), Granizo, Huracán, Lluvia, Nevada, Nublado, Rayo, Relámpago, Tormenta, Trueno.

27. Cartografía (10): Contorno, Equinoccio, Frontera, Latitud, Leyenda, Lupa, Mapa, Norte, Norte magnético, Travesía.

28. Profesión Geológica (10): Estratos, Geología, Geólogo explorador, Geo, La Tierra, Minero, Mina, Rock & Hammer, Terreno, Estructura.

29. Términos Geológicos (12): Cataclismo, Discordancia, Erosión, Espora, Estratos, Formación, Hiato, Litología, Lítico, Ripple, Outcrop, Transecta.

30. Cosmos y Planetas (18): Celeste, Cósmico, Eclipse, Estrellas fugaces, Gravedad, Lunas, Lunar, Mercury, Meteoro, Meteorito,

Orbis, Planeta, Sideral, Satélite, Supernova, Tethys, Terrícola, Cosmos.

31. Alegóricas o Simbólicas (10): Aterra, Gaia, Iapetus, Lithos, Pangea, Phoebus, Telurian, Terra, Tantalus, Vulcano.

Posteriormente, estas 31 subcategorías se agruparon en siete (7) grandes categorías o grupos que abarcan aspectos como vida pasada (fósiles), tiempo geológico, materiales (rocas, minerales, gemas), procesos como vulcanismo o sedimentación, paisajes y geoformas, clima y atmósfera, representaciones simbólicas o profesionales, y elementos cartográficos.

La organización se basó en la función narrativa de cada motivo y en la manera en que contribuye a comunicar la identidad del vino: su suelo, su origen o una interpretación simbólica del territorio. La inclusión de siluetas, fotografías, grabados, mapas, perfiles estratigráficos o símbolos permitió ubicar cada motivo dentro de un grupo coherente, facilitando así la comparación entre etiquetas y la interpretación de sus estrategias visuales y comunicacionales.

La aplicación de esta tipología facilita estandarizar el análisis de la iconografía geológica en etiquetas de vino, comparar tendencias entre regiones, bodegas o estilos, entender cómo la geología se integra en las narrativas visuales del terroir, y ofrecer una base replicable para estudios futuros sobre diseño, patrimonio natural y comunicación territorial en la industria vitivinícola

Tabla 1. Clasificación en grupos y subcategorías

Paleontología y Tiempo Geológico	Petrología y Minerales	Procesos y Ambientes Geológicos	Geodinámica y Estructura de la Tierra	Clima y Fenómenos Atmosféricos	Representación, Ciencia y Profesión	Dimensión simbólica, cósmica y alegórica
Fósiles	Minerales	Volcanes	Geología Estructural	Clima	Cartografía	Cosmos & Planetas
Tiempo Geológico	Gemas & Piedras Preciosas	Ambientes Sedimentarios	Sísmica	Meteorología	Geología como profesión	Alegóricas o Simbólicas
Supercontinentes	• Elementos Químicos • Metales y Minerales	Sedimentos	Energía		Términos geológicos	
Estratigrafía	Críticos	Terrenos & Suelos				
	Rocas • Rocas ígneas • Rocas sedimentarias • Rocas metamórficas	Geomorfología & Relieve Montañas Quebradas y Valles Cuevas y Cavernas Fluviales, Aluviales y Deltas Lagos y Lagunas Geiseres y Manantiales				

La descripción, componentes y características de cada categoría y subcategoría se describen a continuación:

1. Paleontología y Tiempo Geológico

Incluye fósiles, criaturas extintas, estratigrafía simbólica y referencias al tiempo geológico, agrupados en las subcategorías: Fósiles, Tiempo Geológico, Supercontinentes y Estratigrafía.

Fósiles y Paleontología (42)

Es una categoría muy frecuente y representativa, que recurre a fósiles o referencias paleontológicas locales como elemento central del diseño. Constituye una de las más abundantes y reconocibles dentro del repertorio visual enológico.

Dentro de la categoría, se registraron etiquetas que utilizan motivos, o incluyen ilustraciones y nombres como: Alveolina (foraminíferos), Amonites, Aves primitivas (Gargantuavis), Belemnites, Bosque petrificado, Braquiópodos, Bivalvos, Caracolas, Celacanto, Conchas marinas, Crinoides, Diatomeas, Dinosaurios (Ampelosaurus, Brontosaurus, Rhabdodon, T-Rex, Variraptor), Dientes de tiburón, Equinoideos, Erizos y estrellas de mar, Fósiles precámbricos, Gastrópodos, Icnofósiles (Cruziana, Spirorhaphé), Mamuts, Mastodontes, Megalodón, Megaterio, Nummulites, Nautilus, Ostras, Peces, Plantas fósiles, Plesiosauros, Pterodáctilo, Toxodonte, Triceratops, Trilobites, Tortugas, Turritelas, Velociraptor.

Cada nombre alude a un organismo o huella del pasado preservado en las rocas que hoy sustentan los viñedos, y, por lo tanto, a una etapa específica de la historia geológica del terroir.

Desde un punto de vista técnico, estas etiquetas se refieren al ambiente sedimentario donde se formaron

muchas de las secuencias fosilíferas, los procesos de diagénesis y litificación que transformaron los sedimentos en las rocas originales del suelo vitícola y a la composición mineral y textura del suelo, que influyen en la retención hídrica, aireación y mineralidad del vino.

El uso de fósiles como motivo visual o denominativo convierte la etiqueta en un registro gráfico del tiempo geológico. Los ammonites y belemnites evocan mares mesozoicos, los nummulites y bivalvos recuerdan fondos eocenos, mientras que los trilobites o icnofósiles remiten al Paleozoico. Cada referencia fósil establece una conexión entre la edad de la roca y la antigüedad simbólica del terroir.

Las representaciones pueden contener ilustraciones técnicas y detalladas de fósiles, capas o cortes estratigráficos, o una estética evocativa, donde los fósiles se estilizan como espirales, texturas o relieves, sugiriendo continuidad entre la vida antigua y el vino contemporáneo.

Las etiquetas con motivos de amonites constituyen una de las tipologías más frecuentes y reconocibles dentro de las representaciones paleontológicas. Aluden a ambientes sedimentarios marinos, principalmente calizas y margas jurásicas o cretácicas, donde estos fósiles son particularmente abundantes. Representan la antigüedad y continuidad geológica del terroir, y su forma espiral simboliza estructura, equilibrio y evolución, convirtiéndose en un emblema técnico y visual de los suelos calcáreos fosilíferos y de la madurez del vino.

Algunos ejemplos de etiquetas de este grupo pueden observarse en vinos de Australia ("Fossilbed"), Nueva Zelanda ("Fossil Block", "Nautilus"), Portugal ("Fossil"), Grecia ("Evharis"), Argentina ("Génesis", "Ammonite", "Tinto Rex"), Grecia ("Ammonite") y Francia ("Ammonite")



Figura 1. Ejemplos de etiquetas relativas a fósiles y paleontología. Son de las subcategorías más utilizadas y probablemente las más efectivas para comunicar el vínculo entre vino, suelo y territorio.

Terra Fossil, una compañía vinícola norteamericana, utiliza una estética inspirada en siluetas de dinosaurios, basada en fósiles encontrados en un antiguo viñedo argentino. Sus vinos, de variedades conocidas, combinan el marketing con referencias paleontológicas, lo que los hace especialmente atractivos para públicos amplios y eventos

culturales. En la serie analizada aparecen seis formas: dos dinosaurios tipo raptor, uno con postura dinámica; un saurópodo de cuello largo; un dinosaurio con placas (similar a un Stegosaurus), un pterosaurio y un Parasaurolodus, de prominente cresta craneal.



Figura 2. Etiquetas alusivas a fósiles y paleontología. Son de las subcategorías más utilizadas y probablemente las más efectivas para comunicar el vínculo entre vino, suelo y territorio.

La gama "Terroir des Dinosaurios" de la cooperativa vinícola francesa Anne de Joyeuse, se inspira en los fósiles encontrados en la Haute Vallée de l'Aude, una zona con suelos arcillosos del Cretácico que han regalado restos de animales prehistóricos. Los fósiles nombrados en su serie corresponden a un Ampelosaurus atacis, dinosaurio saurópodo descubierto en la región; una Gargantuavis philoinos, ave gigante de hace unos 70 millones de años; un Rhabdodon priscus, dinosaurio herbívoro del Cretácico y un Variraptor, terópodo carnívoro del Cretácico tardío.

Durante la investigación aparecieron algunos casos llamativos de etiquetas que hacen referencia a los icnogéneros Cruziana y Spirorhaphé (Spirorhaphé). Cruziana es una huella fósil con dos lóbulos y finas estrías oblicuas, que suele observarse en relieve sobre la roca. Spirorhaphé, en cambio, es una traza tubular y lisa que forma un característico patrón en espiral. Los vinos que aluden a estas icnitas son "Cruziana" (D.O. Valdepeñas, España) y "Madonna Estate" (Napa Valley, USA).



Figura 3. La etiqueta del vino Madonna Estate (izq) incorpora la imagen estilizada de una icnita espiralada, inspirada en trazas fósiles características de Spirorhaphé (der).

Mención especial merece una selección de vinos del sur de Australia donde el diseño de sus etiquetas, de gran impacto visual, se inspira en la extraordinaria biodiversidad y rareza de los fósiles del Ediacárico (Pre-Cámbrico) descubiertos en las Flinders Ranges, uno de los sitios paleontológicos más importantes del mundo. Esta

propuesta que une geología, vino y turismo, destaca la riqueza natural y patrimonial del sur de Australia. Las etiquetas, además de su valor estético, funcionan como un medio educativo que celebra tres símbolos de identidad regional: el vino, los fósiles y el paisaje. (<https://www.facebook.com/theflindersrange>).



Figura 4. a) Etiquetas de la colección Flinders Range Wines, elaboradas exclusivamente y diseñadas en homenaje a la biodiversidad fósil del Ediacárico descubierta en las Flinders Ranges (Australia del Sur) b) Etiquetas inspiradas en lechos fósiles como ARB (Alice's Restaurant Bed), estas etiquetas integran la geología, la paleontología y la vitivinicultura, combinando la memoria del paisaje precámbrico con el carácter enológico de variedades de la región.
<https://www.facebook.com/theflindersrange>

Las bodegas estadounidenses Carlson Vineyards y Three Kheys han desarrollado series completas de etiquetas que combinan humor y temática paleontológica. Carlson presenta vinos como Tyrannosaurus Red (T-Red) y Pearadactyl, donde los dinosaurios se usan de manera divertida en el mundo del vino. Three Kheys sigue esta misma línea creativa con nombres como Pterroir-Dactyl, Vine-lociraptor, Blanc-osaurus y Tri-Barrel-Tops.

Otro caso curioso, es el de la bodega submarina italiana Le Profondità que envejece sus vinos a 4,5 millas náuticas de la costa. Sus etiquetas toman nombres de organismos marinos: Cancellariidae, Turritella, Umbrella y Aplysia. Todos remiten a moluscos y fauna marina.

Tiempo Geológico (16)

Las etiquetas que hacen referencia al tiempo geológico introducen una escala temporal que trasciende la historia humana. Su iconografía incluye fósiles, huellas de dinosaurios, rocas, volcanes, cronogramas, líneas del tiempo, o alusiones a formaciones, eras, periodos y épocas geológicas.

Según Villier (2021), los nombres o edades de formaciones geológicas son utilizados ocasionalmente por los productores de vino en etiquetas y estrategias de

marketing, aunque no existe obligación normativa de hacerlo. Este uso responde más a una intención comunicativa o identitaria, orientada a resaltar el origen geológico del terroir y conferir al vino una dimensión científica o de autenticidad natural, que a un requisito formal de denominación.

El artículo “Wine and the Mists of the Distant Past” examina el uso habitual de nombres geológicos en la comunicación del vino y advierte que muchas de estas referencias, aunque atractivas, suelen emplearse sin precisión científica. Explica de manera sintética cómo se define el tiempo geológico y destaca la diferencia entre la antigüedad de la roca madre y la del suelo real del viñedo. Concluye que, para evitar confusiones, es necesario utilizar una terminología geológica correcta y actualizada al describir terroirs y etiquetas.
<https://worldoffinewine.com/uncategorized/wine-and-the-mists-of-the-distant-past-geological-time-explained-4712624>

Entre los nombres de vinos que aluden a períodos geológicos en sus etiquetas se encuentran: “Cámbrico, Cretácico, Devónico, Eoceno, Eón, Holoceno, Jurásico, Luteciense, Mesozoico, Mioceno, Oligoceno, Paleozoico, Plioceno, Silúrico, Triásico, Ypresiense”



Figura 5. Etiquetas que aluden al tiempo geológico, utilizadas para contextualizar la antigüedad y evolución del territorio vitícola.

La bodega francesa Thibault Legrand considera que la geología es el factor más determinante en la identidad de un vino. Por eso embotella sus champagnes según los estratos presentes en el subsuelo del viñedo. Produce champagnes con referencias geológicas precisas, cada uno nombrado según una época (Luteciense, Eoceno, Ypresiense) y centrado en la historia del terreno que yace bajo las vides.

Ejemplos de esta tendencia también pueden observarse en vinos de Borgoña (“Terres Jurassiques”), USA (“Triassic”), Chile (“Cámbrico”), o Nueva Zelanda (“Jurassic Ridge”).

Estas representaciones evocan la antigüedad y la continuidad de la Tierra, mostrando al vino como el resultado de procesos naturales que existían antes de la presencia humana. Los fósiles simbolizan la unión entre lo vivo y lo mineral, un puente entre la vida y la piedra.



Figura 6. Alusión a supercontinentes y paleo-océanos en las etiquetas.

Nombres de antiguos océanos como “Thetys” (en Francia y Grecia) o “Mar de Thetys” (en España) identifican a varios vinos europeos y evocan el gran mar interior que existió entre el Paleozoico y el Cenozoico. De manera similar, la bodega estadounidense Iapetus retoma el nombre del océano que hace millones de años cubrió el valle del Lago Champlain, en la frontera noreste entre USA y Canadá.

Estratigrafía (7)

Las etiquetas de vino con motivos estratigráficos se inspiran en la estructura temporal y secuencial de las rocas sedimentarias, utilizando conceptos propios de la geología y estratigrafía para construir un relato gráfico y conceptual del tiempo geológico. Los nombres asociados a la categoría incluyen: “Estrato, Estratigrafía, Formación, Discordancia, Hiato, Stratum, Substrata”



Figura 7. Diseños inspirados en columnas o perfiles estratigráficos, empleados para comunicar la historia sedimentaria del viñedo.

Desde un enfoque técnico, estos diseños remiten a la superposición de capas y a la lectura del subsuelo como

archivo temporal, estableciendo una analogía entre la estratigrafía y la evolución del vino.

Términos como Discordancia o Hiato aluden a interrupciones o cambios en la secuencia, evocando transformaciones naturales que pueden asociarse simbólicamente con la maduración o las transiciones enológicas. Las representaciones de capas, cortes o perfiles del terreno expresan la complejidad y antigüedad del suelo, mientras que la noción de Formación sugiere un origen geológico definido y la de Estratos destaca la acumulación de procesos que configuran el terroir. La disposición de las secuencias o estratos simboliza la historia geológica acumulada.

En conjunto, estas etiquetas articulan una metáfora científica del tiempo y del origen, donde la geología se traduce en un recurso gráfico que refuerza la autenticidad, la antigüedad y la complejidad del vino.

2. Petrología y Minerales

Abarca cristales, texturas petrográficas, rocas ornamentales y representaciones mineralógicas, gemas, elementos y minerales críticos. Incluye las subcategorías: Minerales, Gemas y Piedras Preciosas, Elementos Químicos, Metales y Minerales Críticos, Rocas (Ígneas, Sedimentarias y Metamórficas) y Piedras.

Minerales (53)

Las etiquetas centradas en motivos minerales representan una de las vertientes más directas de la visualización



La colección “Mineral Wines” utiliza minerales icónicos como motivo central de cada etiqueta. Cada botella muestra un mineral diferente, presentado como pieza de colección, lo que refuerza una estética geológica muy marcada y una fuerte identidad visual. Las imágenes destacan por sus colores intensos y por la variedad mineralógica representada. Se distinguen 13 diferentes: amazonita y cuarzo ahumado, rodocrosita, diopstasa en

geológica en el diseño enológico. Incorporan imágenes, texturas o patrones inspirados en estructuras cristalinas, vetas, hábitos o fragmentos minerales, a menudo acompañadas por los nombres de los propios minerales o formaciones.

Entre los motivos más frecuentes se encuentran: “Alabastro, Albita, Almandino, Apatito, Aragonito, Berilo, Biotita, Blenda, Calcedonia, Citrino, Cianita, Cornalina, Crisolito, Cuarzo, Epidoto, Esfena, Espinela, Estauroлита, Galena, Geoda, Granate, Heliodoro, Jaspe, Lapislázuli, Malaquita, Mica, Mineral, Minerales, Morganita, Ojo de tigre, Olivino, Ónix, Oropimente, Ópalo, Opalina, Pedernal (es), Prehnita, Peridoto, Piropo, Pirita, Rodocrosita, Rodonita, Rose Rock, Rosa del Desierto, Selenita, Serpentina, Siderita, Sílice, Sílex, Turmalina, Uvarovita, Yeso”.

Estas representaciones suelen evocar la pureza, el brillo o la geometría natural de los cristales, subrayando el carácter elemental y estructural de la materia. Desde un punto de vista simbólico, los minerales se relacionan con la autenticidad y la energía interna del vino. A través de estas imágenes se busca transmitir sensaciones como textura, acidez o persistencia. Las formas cristalinas o en láminas sugieren orden, equilibrio y cuidado en la elaboración, uniando la idea de ‘mineralidad’ del suelo con la que se percibe en el sabor.

Figura 8. Motivos minerales que refuerzan la idea de composición del suelo y su influencia en el carácter del vino. Las etiquetas de esta subcategoría emplean imágenes o texturas llamativas y coloridas inspiradas en estructuras minerales y cristales. Otras hacen alusión directa al mineral.

calcita, amatista en cuarzo, oro nativo, benitoita, azurita con arsentsumebita, fluorita y aguamarina, plata nativa, wulfenita, pentagonita, oro nativo y bentonita and neptunita.

Gemas y Piedras Preciosas (15) & Elementos Químicos, Metales y Minerales Críticos (26)

En el grupo de minerales y rocas se pueden considerar también las etiquetas con gemas y piedras preciosas y las de elementos químicos: las primeras constituyen una variante más simbólica y conceptual. Los nombres de gemas y piedras preciosas en etiquetas, tales como “Ágata, Ámbar, Amatista, Azabache, Coral, Cristal, Diamante, Diópsido, Esmeralda, Gema, Jade, Perla, Rubí, Turmalina, Zafiro” evocan la nobleza, el brillo y la rareza, asociando el vino con valores de distinción y refinamiento.

Las menciones a elementos químicos y nativos, metales y minerales, incluyendo aquellos críticos y raros, aluden a la composición elemental del suelo o a la energía que transforma la materia. Estas imágenes combinan la mirada científica con una idea casi alquímica: el vino entendido como el resultado de una transformación natural.

Las etiquetas que hacen alusión a metales, minerales nativos y minerales críticos suelen adoptar un estilo visual sobrio y contemporáneo. Predominan las composiciones limpias, sin tipografías ornamentadas, y una paleta basada en tonos oscuros, negros, como grafito o antracita, combinados con tonalidades en plata, grises metalizados o cobre oxidado, que remiten directamente al brillo o textura de estos recursos geológicos.

Los nombres de los vinos se presentan con alta legibilidad, utilizando tipografías de trazo firme, que evocan precisión técnica y un lenguaje casi industrial. A veces incorporan símbolos químicos, códigos mineralógicos, patrones cristalográficos o líneas geométricas inspiradas en diagramas estructurales, reforzando la asociación con minerales estratégicos como litio, cobalto, níquel, tierras raras o cuarzo.

Entre las etiquetas con estos nombres están: Barita, Cobalto, Cinabrio, Cobre, Cromo, Elementos, Estaño, Grafito, Hierro, Litio, Magnesio, Níquel, Oro, Paladio, Plomo, Platino, Rubidio, Sal, Sílice, Sólido, Tantalio, Telurio, Tierras raras, Titanio, Tungsteno y Zinc.

Rocas Ígneas (11), Sedimentarias (15), Metamórficas (13)

En las etiquetas inspiradas en rocas, el nombre hace alusión evidentemente al tipo de roca predominante en la zona de los viñedos. Estas etiquetas suelen representar afloramientos, fracturas o texturas superficiales que remiten a materiales específicos, tales como pizarra, granito, basalto o caliza, y cuya denominación comercial a menudo coincide con el nombre de la roca como Basáltico, Granítico, Calcáreo, Pedregoso o Arenero, entre otros.

El uso de estos motivos subraya la relación directa entre la geología del subsuelo y la identidad vitícola del territorio. De este modo, la etiqueta traduce visualmente la relación entre naturaleza, técnica y origen. En regiones como Mosela (Alemania) o Priorat (España), la presencia de pizarras y esquistos es utilizada como argumento de identidad, autenticidad y diferenciación.

Diversas regiones vitivinícolas de Sudáfrica y Francia (Alsacia y Auvernia) evidencian una estrecha relación entre la geología y el terroir. Los viñedos se distribuyen sobre secuencias de rocas sedimentarias, volcánicas o metamórficas que actúan como coberturas o basamentos, determinando la estructura, el drenaje y las propiedades mineralógicas de los suelos donde se desarrollan las vides.

Los apelativos de rocas suelen clasificarse según su origen geológico y composición, dando lugar a tres grandes grupos, con sus nombres asociados:

- **Rocas sedimentarias:** “Arenisca, Arkosa, Brecha, Caliza, Creta (Chalk), Conglomerado, Coquina, Dolomita, Grauvaca, Grès, Limolita, Lutita, Margas, Micrita, Travertino”.
- **Rocas ígneas:** “Andesita, Basalto, Dacita, Gabro, Granito, Ignimbrita, Máfico, Obsidiana, Pórfido, Riolita, Xenolito”.
- **Rocas metamórficas:** “Anfibolita, Cuarcita, Esquisto, Filita, Gneis, Hornfels, Metamórfico (a), Migmatita, Orto, Ortogneis, Pizarra, Protolito”.

En algunos casos, el tratamiento gráfico llega a ser más abstracto o estilizado, recurriendo a patrones que evocan la textura pétrea o la estratificación.



Figura 9. Etiquetas de vino que emplean motivos inspirados en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Piedras / Stones (5)

Las etiquetas que emplean el término piedra (stone, stein, pierre) se distinguen de aquellas que aluden a rocas por su connotación material y visual más que estrictamente geológica. Mientras la roca remite al origen y a la estructura del subsuelo, la piedra evoca a material pétreo consistente, transformado y tangible, asociado a la construcción, la permanencia y la textura. En este sentido, “piedra” funciona como signo de solidez, tradición y autenticidad artesanal, atributos que se proyectan sobre el vino como extensión de su carácter mineral y terrenal.

En la categoría, las etiquetas recurren a términos tales como: “Boulder, Dique, Piedra, Rock y Stone”



Figura 10. Ejemplos de etiquetas inspiradas en paisajes geológicos icónicos: a) Split Rock, basada en la Split Apple Rock (Parque Nacional Abel Tasman, Nueva Zelanda) b) Devil's Rock, evocando la formación Devil's Table (Teufelstisch, Alemania) c) Uluru, referencia al monolito de arenisca Uluru/Ayers Rock en el Parque Nacional Uluru-Kata Tjuta (Australia Central).

3. Procesos y Ambientes Geológicos

Reúne volcanes, ríos, glaciares, karst, dunas y otros ambientes naturales o dinámicas superficiales. Comprende las subcategorías: Volcanes, Ambientes sedimentarios, Sedimentos, Terrenos y Suelos, Geomorfología y Relieve (Montañas, Quebradas y Valles, Cuevas y Cavernas,

Su empleo en denominaciones de vinos como Stone Cellars, Steinstück, Piedra Infinita, The Stone Wine, Stone's, Piedra Negra, Castle Rock, One Stone, Sand Stone, Rose Rock, Boulder y Wild Rock enfatizan la dimensión física y sensorial del terroir, más cercana a la experiencia humana del paisaje que a su descripción científica.

Las representaciones gráficas suelen mostrar rocas, perfiles de suelo o paisajes geológicos reconocidos. Ejemplos de esto son las etiquetas de Split Rock, Uluru (Ayers Rock) y Pooles Rock en Australia; Devil's Tables (Teufelstisch) en el sur de Alemania; y Monument Red en Estados Unidos.

Fluviales y Aluviales, Deltas, Lagos y Lagunas, Geiseres y Manantiales)

Volcanes (27)

Las etiquetas que aluden a volcanes, productos o paisajes volcánicos constituyen una de las formas más reconocibles de representación geológica. Su iconografía suele incluir conos, coladas, cráteres, calderas, perfiles y partes de

volcanes o sistemas eruptivos, materiales volcánicos como lava, toba, ceniza, ignimbritas y lapilli, así como referencias directas a toponimias de origen volcánico (Etna, Azores, Lanzarote, Santorini, Tokaj, Pompeya, Maipo, Taupo, etc.).

El diseño de las etiquetas puede llegar a mostrar el paisaje volcánico que se ve desde la bodega o viñedo, está relacionado con alguna palabra geológica alusiva a ígneo, volcán, magma, entre otras, o los viñedos se asientan sobre suelos o rocas volcánicas.

Estas imágenes condensan la fuerza creativa y transformadora de la tierra, evocando la mineralidad y la energía que caracterizan ciertos suelos vitícolas. Desde el punto de vista semiótico, el volcán funciona como símbolo del origen profundo, de la materia en fusión que da forma al terroir. En el plano sensorial, suele asociarse con vinos de carácter intenso, mineral y estructurado.



Figura 11. Iconografía volcánica empleada para representar volcanes, rocas volcánicas o procesos y paisajes eruptivos.

Fernández Portela (2019) señala que los paisajes vitivinícolas de origen volcánico, como los de Santorini, Canarias y las Azores, comparten rasgos distintivos: suelos negros, rocas volcánicas, muros de piedra y viñedos rastreros adaptados para proteger las cepas del viento. Estos elementos confieren una identidad visual y ambiental única a estos territorios.

Sedimentos (15) & Ambientes Sedimentarios (28)

Los sedimentos y ambientes sedimentarios representados en las etiquetas de vino aluden a la diversidad de entornos geográficos y depositacionales donde se acumulan los materiales que dan origen a las rocas sedimentarias. Estas referencias pueden expresarse visual o simbólicamente en el diseño de las etiquetas. Cada ambiente posee una combinación particular de procesos y condiciones geológicas que determinan el tipo y las características de los sedimentos depositados, aportando así un trasfondo geológico distintivo a la identidad visual del vino.

Las etiquetas identificadas con nombres o imágenes relacionadas con volcanes incluyen: “Aa, Basalto, Bomba volcánica, Caldera, Ceniza, Erupción, Escoria (Cinder), Filón, Fusión, Ígneo, Ignio, Ignimbrita, Lahar, Lava, Lapilli, Maar, Magma, Nuée ardente, Pahoehoe, Piro, Piroclástico, Toba, Traquita, Volcán, Volcánico, Vulcano, Vulcanus”

Los vinos volcánicos provienen de suelos ricos en minerales, generalmente de grandes altitudes, de altos niveles de salinidad mineral, también oceánica o sulfurosa y regidos por grandes contrastes térmicos. Ejemplos destacados se encuentran en las denominaciones del Monte Etna (Italia), Santorini (Grecia) o Lanzarote (España), y en América en ciertos vinos chilenos y argentinos (Mendoza, Catamarca). Algunos vinos conocidos de Suramérica son: Igneo, Tierra de Volcanes, Mil Volcanes.

Esto incluye la representación de lugares como playas, deltas, estuarios, glaciares, fondos marinos o lagos, y desiertos, que son ambientes específicos que se pueden identificar y clasificar según las características geológicas y el tipo de sedimentos que se forman en ellos.

Sedimentos (15)

Las etiquetas que mencionan sedimentos o materiales como “Arena, Arcilla, Barros, Caliche, Cantos, Granza, Grava, Limo, Lodo, Loess, Piedras, Rocas, Sedimentario, Tierra, Tierras Raras”, nombres que hoy aparecen en varios vinos del mercado, forman un tipo de etiqueta centrada en el suelo. En ellas, el diseño y el nombre buscan transmitir cómo es el terreno y el terroir del que proviene el vino. El objetivo principal es comunicar la identidad del lugar: su suelo, su clima y su geología, elementos que influyen directamente en la calidad y el carácter del vino.

Estas etiquetas suelen usar colores terrosos, texturas granuladas, relieves que recuerdan estratos o capas de suelo, tipografías sólidas y motivos inspirados en granos,

capas o cortes geológicos. Los nombres basados en sedimentos funcionan como un elemento clave que, en muchos casos, reemplaza o acompaña a la variedad de uva o a la región de origen.

En un plano simbólico, expresan la unión entre el vino y la tierra, resaltando la mineralidad, el origen y el paso del tiempo geológico. Cada término, además, sugiere una cualidad sensorial. Por ejemplo, el caliche, una capa dura y porosa de carbonato de calcio presente bajo la superficie del suelo, es parte fundamental del subsuelo de regiones vitícolas de gran prestigio como Borgoña (Francia) y Jerez (España).

Ambientes sedimentarios (28)

Las etiquetas de vino inspiradas en paisajes y ambientes sedimentarios, forman un tipo de etiqueta centrado en los grandes escenarios naturales. En este caso, la atención está puesta en el paisaje y en los procesos geológicos que lo moldearon, más que en los sedimentos o materiales del suelo.

Estas etiquetas buscan transmitir el clima, la forma del terreno y la historia natural de la región, dándole al vino un fuerte sentido de origen y una conexión con procesos de la naturaleza a gran escala. Tanto el nombre como el diseño remiten a fenómenos como la acumulación de sedimentos, la erosión o el modelado del relieve, creando un relato visual que vincula al vino con su paisaje.

En lo visual, suelen usar colores asociados al ambiente que representan: azules profundos para lo marino, ocre para lo desértico, verdes para lo lacustre o blancos para lo glacial. También emplean texturas onduladas o fluidas que sugieren movimiento, junto con tipografías limpias que transmiten sensación de amplitud y naturaleza abierta.

Cada nombre encontrado se relaciona con un tipo de ambiente sedimentario, por lo que la variedad es amplia: ambientes marinos y costeros (Abisal, Arrecife, Bahía, Barra de arena, Costa, Flysch, Isla, Istmo, Línea de costa, Mar, Marea, Océano, Oceánico, Olas, Playa); ambientes áridos y de dunas (Duna (s), Dunitas, Desierto, Médanos, Pampa); sistemas fluviales y lacustres (Delta, Lago, Laguna, Oasis, Planicie) y paisajes glaciares o de montaña (Fiordo, Glaciar, Morrena).

Terrenos y Suelos (11)

Las etiquetas que adoptan nombres o denominaciones como “Árido, Arenero, Calcáreo, Granítico, Laterita, Loam

(Franco), Pedregal, Pedregoso, Peñascal, Petrosus, Sapolito” destacan las propiedades físicas y químicas del suelo como factor identitario del vino. Estos términos aluden a la textura, permeabilidad y composición mineral del sustrato, elementos que condicionan el vigor de la vid y la expresión del terroir. Visualmente, recurren a texturas granulares, tonos terrosos o motivos litológicos que refuerzan la correspondencia entre geología y perfil enológico.

Los suelos calcáreos, por ejemplo, son suelos minerales con un alto contenido de carbonato de calcio, cuya formación ha estado condicionada por el clima. El suelo calcáreo ayuda a equilibrar la acidez del suelo, favoreciendo un desarrollo óptimo de la vid y la calidad de vinos. Son de buen drenaje y ricos en nutrientes y minerales. Producen vinos de buen contenido alcohólico, de baja acidez y de muy buena calidad. Regiones como Champagne, Borgoña, Chablis en Francia, así como Priorat y Ribera del Duero en España, son ejemplos de lugares con suelos calcáreos reconocidos por su influencia en los vinos.

Los terrenos graníticos, formados por la erosión y descomposición del granito, originan suelos arenosos y pobres en arcilla, con alta permeabilidad y baja capacidad de retención de agua y nutrientes, pero dotados de una notable capacidad térmica: se calientan con rapidez durante el día y se enfrían con igual velocidad por la noche. Presentes en Francia, Portugal y regiones españolas como Rías Baixas, Ribeiro, Valdeorras, Bierzo, Sierra de Gredos y Alella, estos suelos favorecen vinos de gran frescura y acidez equilibrada. En los blancos, como los de Rías Baixas, se expresan en perfiles florales, salinos y persistentes, mientras que, en los tintos, como las Garnachas de Gredos, confieren ligereza, vivacidad y una intensa expresión aromática. (<https://www.decantalo.com/es/es/blog>).

En este tipo de diseños de etiquetas, el terreno se convierte en un signo técnico y simbólico de origen, que legitima la autenticidad del vino a través de su vínculo directo con el suelo.

Geomorfología, Paisajes y Relieve (23)

Las etiquetas inspiradas en la geomorfología y los rasgos del relieve trasladan al recurso gráfico los procesos que modelan la superficie terrestre y los productos de ello. Montañas, valles, quebradas, taludes, acantilados o riscos aparecen como símbolos de la energía geodinámica y modelado del paisaje y del origen físico del viñedo. En este tipo de representaciones, la morfología del terreno se

convierte en signo de identidad: un vino de montaña evoca altitud y pureza; uno de valle, fertilidad y equilibrio; mientras que quebradas y cañones sugieren fuerza y profundidad.

Fernández Portela (2019) destaca que las etiquetas de vino que muestran viñedos y paisajes reflejan elementos geográficos como relieve, ríos y otros cuerpos de agua, fundamentales en la configuración del territorio vitivinícola. Estas representaciones transmiten la identidad y singularidad de cada región, mostrando la diversidad de entornos donde se cultiva la vid: llanuras, terrazas, vegas fluviales, piedemontes, zonas volcánicas, ambientes mediterráneos u oceánicos. Así, las etiquetas permiten al consumidor reconocer visualmente las características geográficas que definen el origen del vino.

Dentro de la categoría, se identificaron nombres como: “Abismo, Acantilados, Avalancha, Barranca, Cabo, Cliff, Crestas Deslizamiento, Escarpa, Landslide, Mesa, Morro, Península, Piedemonte, Plateau, Relieve, Ridge, Riscos, Roche moutonnée, Rockslide, Talud, Terrazas, Topografía”.

Algunas etiquetas recurren a recursos técnicos como perfiles topográficos, cortes geológicos o siluetas del relieve que enfatizan la precisión científica del terroir. Otras adoptan un enfoque pictórico o fotográfico, orientado a la evocación emocional del paisaje y de su tradición vitícola. Nombres y denominaciones como “Altamira, Sierra de los Andes, Relieve, Barranca, Terrazas de los Andes, Ridges o Cliffs” refuerzan esta conexión entre geografía y expresión del terroir.

Estas imágenes crean un relato claro y atractivo donde la geología ayuda a mostrar la autenticidad del vino y el lugar de donde proviene. La etiqueta se convierte así en un puente entre el conocimiento científico y la identidad del vino, permitiendo que cada botella cuente su historia y su vínculo con el territorio.

Montañas (10)

Las etiquetas centradas en motivos orogénicos y montañosos trasladan al lenguaje visual del vino el tectonismo y la monumentalidad del relieve. Denominaciones como “Cerros, Cimas, Cordilleras, Cumbres, Ladera, Lomas, Montañas, Orogenia, Picos, Ranges”, solas o combinadas con adjetivos, evocan distintos aspectos de la morfología y del dinamismo terrestre. Su empleo refuerza la idea de altura, pureza y origen estructural, vinculando el vino con un paisaje de

contrastes y pendientes pronunciadas, donde el suelo, el clima y la exposición solar definen perfiles sensoriales distintivos.

Desde el punto de vista simbólico, estas etiquetas transforman la montaña en emblema de carácter y autenticidad, aludiendo tanto a la fuerza de la naturaleza como al esfuerzo humano que permite cultivar en terrenos extremos. Visualmente, pueden incorporar siluetas de cordilleras, líneas de pliegues o estilizaciones de perfiles geológicos, que funcionan como signos de identidad territorial. Este tipo de etiquetas integra la dimensión geológica, estética y narrativa del vino, presentando el relieve como una forma terrestre visible e histórica. Las etiquetas se asocian generalmente al lugar geográfico del terruño o bodega. Ejemplos notables: Mt Monster, Douglas Hills, Hillcrest, Jurassic Ridge, Pine Ridge, Tres Picos, Ancient Peak, entre muchas otras.

Quebradas y Valles (3)

Las etiquetas inspiradas en quebradas y valles remiten a la morfología erosiva del paisaje, asociando el vino a la fertilidad de los fondos aluviales o a la fuerza de los cauces que modelan el terreno. Representan líneas sinuosas, terrazas o cortes topográficos que sugieren profundidad, frescura y movimiento. En el plano simbólico, evocan refugio y continuidad, donde la geografía se traduce en equilibrio y armonía del vino. Entre los nombres recurrentes de vinos se encuentran los asociados a Creeks (Quebradas), Valleys (Valles) y Gullys (Barrancas).

Algunas denominaciones conocidas: The Valley, Jacob’s Creek, Coopers Creek, Diamond Creek, Cedar Creek, Camel Valley, Grants Gully y La Quebrada,. Entre los suramericanos, se encontraron: Valle Hermoso, Valle del Sur, Valle Frio, Valle Andino, Quebradas y Valle del Sol.

Cuevas y Cavernas (6)

Las etiquetas que aluden a cuevas o cavernas se inspiran en el mundo subterráneo y en la idea de origen mineral. Su imagería: estalactitas, rocas húmedas, sombras o relieves interiores, sugiere maduración, silencio y permanencia. Estas etiquetas asocian el vino con la profundidad terrestre y con los procesos geológicos ocultos que simbolizan la esencia y la memoria del tiempo. Otras lo asocian a refugios de animales salvajes.

Dentro de la categoría, se identificaron nombres como: “Cuevas, Cavernas, Dolina, Estalactita, Estalagmita y

Karst”, generalmente referidas a un lugar geográfico. Ejemplos de estas representaciones son los vinos denominados Karst, Cuevas, Cavernas, Cerro Las Cuevas, Cavern, The Cave, Cueva De Lobos, Cueva De Zorro, Cueva De Las Manos.



Figura 12. Etiqueta Karst, inspirada en paisajes kársticos del sur de Francia. La denominación hace referencia directa al paisaje y al sustrato geológico de la parcela, caracterizado por rocas carbonatadas disueltas que forman un relieve kárstico típico de la zona.

Fluviales, aluviales y deltas (16)

Las etiquetas inspiradas en ambientes fluviales y aluviales utilizan motivos como ríos, meandros, deltas, terrazas, ondas de corriente, capas o sedimentos característicos o elementos del sistema o ambiente fluvial. El diseño de las etiquetas puede referirse a ríos cercanos a los viñedos.

Estas representaciones aluden a la dinámica de los procesos geológicos superficiales asociados a movimiento y sedimentación, enfatizando la interacción entre agua, clima, suelos y tiempo. Los ríos crean una topografía especial, creando valles de diferentes dimensiones y profundidad, que favorecen distintos climas según la orientación o altitud de las zonas de plantación de las cepas.

Desde la perspectiva simbólica, el río o el ambiente sedimentario expresan fluidez, fertilidad y renovación, cualidades asociadas a la vida y al ciclo natural. En el contexto del vino, la iconografía fluvial remite a la formación del suelo aluvial, base de muchas regiones vitivinícolas (por ejemplo, los valles del Ródano, del Loira o del Maipo).

Este tipo de etiqueta comunica visualmente una geología tranquila y formativa, donde el tiempo geológico se deposita capa a capa. Los recursos gráficos suelen ser líneas onduladas, texturas de grano fino y paletas terrosas o ocres, que sugieren sedimentación y flujo natural de corrientes.

Las grandes zonas vitícolas mundiales se encuentran cerca de ríos. Entre los famosos están: de España (Ebro, Duero, Rueda, Arlanza, Arribes, Miño, Ribeiro, Toro, Guadalquivir), Francia (Loira, Ródano, Garona), Alemania (Rin, Mosela), California (Napa), Chile (Maipo, Maule) y Argentina (ríos patagónicos, Río Negro, Paraná).

En las etiquetas de muchos vinos se identifican nombres relativos al tema fluvial, como: “Abanico aluvial, Aluvión, Aluvional, Arroyo, Bedrock, Canal, Cascadas, Delta, Levee, Meandro, Napas, Planicie aluvial, Ribera, Río, Terrazas y Tributario”.



Figura 13. Ejemplos de etiquetas que incorporan motivos fluviales y aluviales. Destacan ríos con líneas onduladas que evocan cursos de agua; texturas y fragmentos propios de orillas y depósitos de borde de canales (riverbank), un canal fluvial y una alusión directa a abanicos aluviales andinos.

Lagos y Lagunas (3)

Estas etiquetas remiten a paisajes lacustres donde el agua actúa como moderador climático y símbolo de pureza y equilibrio natural. El nombre o la imagen del lago inscribe el vino en su entorno hidrogeológico, evocando frescor, profundidad y armonía. El diseño de las etiquetas se refiere generalmente a lagos o lagunas cercanas a los viñedos o alusivos a sus aguas.

En la categoría, las etiquetas reconocidas utilizan denominaciones como: “Lago, Lagos, Laguna”. Algunos ejemplos encontrados son: Lago, El Lago, Il Lago, Lagos de los Andes, Crystal Lake, Crane Lake, Buckeye Lake, Vin Du Lac, Lake Country, Villa del Lago, Lagoon View, etc.

Desde una lectura visual, el lago se convierte en sinónimo de reflexión y transparencia, integrando el paisaje acuático en la identidad del terroir.

Aguas Subterráneas e Hidrotermales (3):

Las etiquetas que incorporan motivos de géiseres y manantiales representan procesos hidrogeológicos vinculados a la circulación y surgencia de agua subterránea. Estas imágenes evocan la energía interna del

subsuelo y la mineralización que define el carácter del terroir.

Dentro de la categoría se identificaron nombres como: “Artesian, Geysers y Manantiales (Springs)”. El nombre Artesian alude a los pozos artesianos, formados por la presión del agua en capas profundas del subsuelo. Esta referencia geológica se conecta con el vino porque evoca suelos, estratos y aguas subterráneas que influyen en el viñedo. Así, la bodega usa la idea de “profundidad natural” para reforzar la identidad y el carácter de sus vinos. El término Geyser sugiere presión, calor y dinámica geotermal, asociando el vino con un origen energético y mineral. En cambio, Spring (manantial) insinúa fluidez, pureza y renovación, vinculando el proceso enológico con el ciclo natural del agua. Ambos motivos reflejan la interacción entre geología e hidrología, reforzando la idea de un vino surgido de procesos profundos y naturales.

Las etiquetas generalmente refieren el accidente geográfico donde se localiza la fuente hidrotermal, por ejemplo: Geyser Peak, Spring Mountain, Spring Valley, Spring Creek, Cave Spring, Warm Spring, Hot Spring Mountain, etc.

4. Geodinámica y Estructura de la Tierra

Comprende fallas, pliegues, tectónica de placas, corteza terrestre, perfiles geológicos, energía y geodinámica interna, reunidas en las subcategorías Geología Estructural, Sísmica y Energía.



Figura 14. Etiquetas de vino que incorporan conceptos de la geología estructural como recurso visual y narrativo. De izquierda a derecha: Syncline hace referencia a estructuras plegadas; Red•Car/Heaven & Earth utiliza un perfil geológico esquemático; Boruca y Mantlepiece integran líneas onduladas que evocan estratos deformados, fallados o intruidos; Tectonic alude directamente a los procesos de placas; Gestos representa bloques levantados y fallados típicos de la tectónica andina y Fault Line destaca explícitamente la presencia de una falla como elemento central del diseño.

Este tipo de etiquetas se asocia con bodegas que buscan comunicar un enfoque científico o técnico, a menudo acompañadas por datos geográficos o mapas de formaciones. Ejemplos pueden encontrarse en vinos de regiones con marcada geodinámica, como los Andes chilenos y argentinos, la costa pacífica norteamericana de

Geología Estructural: tectónica, pliegues, fallas y deformación (35)

Las etiquetas de temática la geología estructural y la geodinámica interna introducen elementos como pliegues, fracturas, cortes geológicos o diagramas tectónicos. Estas representaciones enfatizan la arquitectura interna del subsuelo, mostrando cómo las fuerzas endógenas moldean el relieve y condicionan el terroir. Pueden incluir términos de geodinámica y geología estructural. Algunas hacen referencia a contornos estructurales o mostrar secciones o cortes geológicos.

En términos visuales, los pliegues y fallas se traducen en líneas angulares o curvilíneas, patrones estratificados y contrastes cromáticos que evocan la compresión y deformación de la corteza terrestre. En el plano simbólico, estos motivos expresan tensión, historia y profundidad temporal, sugiriendo que el vino es el resultado de un proceso estructural complejo y dinámico.

Denominaciones como Alóctono, Batolito, Continental Divide, Cuenca, Domo, En echelon, Epicentro, Estructura, Fallas, Falla (línea de), Falla de San Andrés, Folded, Folding, Fractura, Graben, Grieta, Horst, Hot Spot, Limbo, Manto, Maremoto, Melange, Monoclinial, Orogenia, Range, Rift, Sinclinal, Subducción, Sismo, Temblor, Terremoto, Tecto, Tectónica, Tsunami, Uplift son identificadas en esta categoría.

California, la zona el Cáucaso, o el Ródano septentrional, donde la tectónica tiene un papel determinante en la configuración del paisaje vitícola.

Sísmica (3)

Las etiquetas que adoptan la sísmica como motivo conceptual y visual trasladan al lenguaje del diseño los procesos de deformación y liberación de energía propios de la geodinámica y tectónica. Denominaciones encontradas, como “Dinamita, Sísmica y Resonancia” aluden a fenómenos de ruptura, propagación de ondas y reconfiguración del subsuelo, estableciendo una analogía entre la energía interna de la Tierra y la expresión estructural del vino.

Desde una perspectiva geocomunicacional, estas etiquetas articulan una gramática visual basada en líneas de fractura, trazos ondulatorios o patrones de desplazamiento, que evocan tanto los registros sísmicos como los pliegues y fallas del terreno vitícola. Este enfoque refuerza la relación entre la tectónica, el subsuelo, el paisaje y la morfología sensorial del vino, integrando los conceptos de elasticidad, vibración, tensión y equilibrio. La temática sísmica funciona como un dispositivo simbólico y territorial, donde la representación de la energía geológica legitima el origen del vino y lo inscribe en un marco de precisión científica y autenticidad material.

Energía y Materia Orgánica Fósil (12)

Las etiquetas de vino diseñadas a partir de motivos de energía terrestre representan una vertiente conceptual que vincula la geología, la materia y el universo como símbolos de origen, transformación y energía vital del vino. Estas categorías se pueden diferenciar según su referencia principal.

Las etiquetas más comunes inspiradas en estos temas, son “Antracita, Brea, Carbón, Eólico, Lignito, Mina, Minas de carbón, Petroco, Petrolette, Petrolero, Reservorio, Roca Madre” y aluden al potencial energético del subsuelo y a los procesos geológicos de generación de hidrocarburos y carbón mineral. Desde un punto de vista técnico, estas etiquetas remiten a ambientes sedimentarios reductores donde la materia orgánica, se acumuló, compactó y transformó en kerógeno o carbón. Conceptualmente, simbolizan la energía concentrada en la tierra, la madurez térmica y la intensidad estructural del vino, asociadas a su cuerpo, color y persistencia. Otros pocos se asocian a energía derivada de otras fuentes de energía, como el viento (Eólico).

En términos de diseño, predominan paletas oscuras, metálicas o bituminosas, texturas de rocas fracturadas y

superficies brillantes que evocan profundidad, densidad y potencia mineral.

5. Clima y Fenómenos Atmosféricos (15)

Engloba nubes, tormentas, rayos, vientos, ciclos climáticos y otros elementos atmosféricos en la subcategorías Clima y Meteorología.

Las etiquetas de vino basadas en motivos climáticos y atmosféricos trasladan al lenguaje visual y conceptual las condiciones atmosféricas que intervienen en la maduración de la vid y en el carácter sensorial del vino. Estas denominaciones, como Alisio, Anticiclón, Brisa, Bruma, Ciclón, Clima (Weather), Granizo, Huracán, Lluvia, Nevada, Nublado, Rayo, Relámpago, Tormenta y Trueno, entre otras, evocan la dinámica meteorológica como fuerza modeladora del paisaje vitícola y símbolo de la energía natural contenida en cada cosecha.

Desde un enfoque técnico, estas etiquetas aluden a factores climáticos críticos del terroir, como la pluviometría, radiación solar, amplitud térmica, humedad relativa o incidencia de heladas, que determinan la fisiología de la vid y la composición de los frutos (acidez, azúcares, compuestos fenólicos).

El uso de términos asociados a fenómenos meteorológicos intensos o cambiantes (como Tormenta o Relámpago) sugiere vinos de perfil vibrante, energético y expresivo, mientras que nombres como Nublado o Nevada remiten a vinos más frescos, equilibrados y de clima frío. En conjunto, estas etiquetas configuran una poética del clima, donde el diseño visual y el nombre actúan como una traducción atmosférica del terroir, combinando ciencia, naturaleza y emoción en un mismo signo gráfico.

6. Representación, Ciencia y Profesión

Integra mapas, cortes estratigráficos, brújulas, herramientas, iconografía científica y figuras del oficio geológico y minero dentro de las subcategorías: Cartografía, Geología como Profesión, y Términos geológicos

Cartografía (10)

Las etiquetas que incorporan mapas geológicos, topográficos o parcelarios inscriben visualmente el vino en su territorio de origen. A través de cortes estratigráficos, perfiles del subsuelo o relieves estilizados, traducen el terroir en un lenguaje técnico y verificable.



Figura 15. Variedad de diseños de etiquetas de vino que utilizan elementos geométricos de cartografía y mapas topográficos y geológicos junto con patrones abstractos (Contour) como elementos centrales de su marca.

El mapa actúa como símbolo de autenticidad y trazabilidad, evocando la mirada del geólogo o del agrónomo sobre el paisaje vitícola. Este tipo de diseño, frecuente en vinos de alta gama o de producción limitada, convierte el envase en un testimonio del conocimiento científico y de la identidad geológica del vino.

Algunas denominaciones de vinos de esta categoría son: Contorno, Equinoccio, Frontera, Latitud, Leyenda, Lupa, Mapa, Norte, Norte magnético, Travesía.

Destaca en este rubro, la propuesta mendocina “Geografía del Vino” compuesta por tres vinos donde los mapas son el elemento central y funcionan como un recurso visual que destaca la singularidad geográfica de cada terroir. Detrás de este proyecto hay un geofísico que, tras estudiar en detalle estos suelos, decidió crear vinos excepcionales cuya identidad también la expresó en el diseño de las etiquetas (<https://geografiadelvino.com/2021/04/26/vinos/>)

Geología como profesión (10)

Las denominaciones identificadas en esta categoría, como “Estratos, Geología, Geólogo explorador, Geo, La Tierra, Minero, Mina, Rock & Hammer, Terreno, Estructura” evocan directamente la práctica científica del estudio del subsuelo. En ellas, la etiqueta actúa como una metáfora del trabajo geológico: observación, cartografiado e interpretación de capas y procesos que revelan el pasado de la Tierra.

Visualmente, suelen incorporar perfiles estratigráficos, cortes de terreno, instrumentos de campo o texturas sedimentarias, trasladando al envase un lenguaje técnico de observación y análisis. Desde el punto de vista conceptual, subrayan la relación entre el vino y su basamento geológico, proponiendo una lectura del terroir

como “formación” o “estructura natural” que sostiene la identidad del producto.

Términos geológicos (12)

En este grupo, nombres como “Cataclismo, Discordancia, Erosión, Espora, Estratos, Formación, Hiato, Litología, Lítico, Outcrop, Ripple, Transecta”, emplean conceptos específicos de la geología para expresar ideas de tiempo, transformación y memoria material.

El término Hiato sugiere una pausa o ausencia temporal, evocando los intervalos de reposo y maduración en la vinificación. Erosión o Discordancia remiten a procesos de ruptura y renovación en la corteza terrestre, metáforas de la evolución natural y del paso del tiempo que también marcan el ciclo del vino. Formación alude al origen estratigráfico y Espora introduce una dimensión biológica o germinal, vinculando la geología con la vida microscópica y la fertilidad del suelo.

Según Maltman (2018), las referencias geológicas en los nombres de vinos son cada vez más precisas y frecuentes, aluden a la litología, escala geológica, procesos geológicos, fósiles o suelos locales. Los términos técnicos reflejan la geología del lugar, mientras que los nombres de minerales se usan solo por su valor estético o simbólico, no científico.

En Argentina, el subsuelo del sistema Quintuco-Vaca Muerta fue dividido de manera informal en una serie de secuencias a las que se les dieron nombres de cepas o variedades de vino. Estas unidades fueron llamadas Tannat, Cabernet, Merlot, Malbec, Bonarda, Syrah y Torrontés. En conmemoración se hizo una edición, sin uso comercial denominada “Transecta”

La bodega estadounidense lapetus (Jápeto), que toma su nombre del antiguo océano que cubrió el valle donde hoy

se encuentran sus viñedos, utiliza la geología como eje central de su identidad visual y conceptual. Sus vinos adoptan nombres como Alluvium, Subduction, Substrate, Tributary, Protolith o Tectonic, cada uno vinculado a procesos y materiales del paisaje geológico de Vermont: antiguos mares, depósitos glaciares, rocas sedimentarias (calizas y lutitas) y sustratos metamórficos (esquistos y cuarcitas). En sus vinos espumantes, las etiquetas incorporan además impresiones de fósiles reales de amonites, braquiópodos y trilobites, que actúan como elementos visuales distintivos. Estos motivos remiten al océano lapetus que cubrió la región hace cientos de millones de años y refuerzan la conexión entre la historia geológica arcaica y el terroir contemporáneo.

Estas etiquetas cuentan una historia donde la geología ayuda a entender mejor el vino. Los diseños inspirados en términos geológicos muestran de dónde procede el vino y cómo es el suelo que lo forma. De esta manera, la geología aporta información y significado, convirtiendo la etiqueta en una pequeña ventana al lugar, terreno y a la historia natural del viñedo. De este modo, la botella no solo muestra una marca, sino también una pequeña historia sobre la tierra que la sostiene.

7. Dimensión simbólica, cósmica y alegórica

Las etiquetas de vino que incorporan motivos geológicos, tanto en su vertiente profesional como conceptual, constituyen una de las expresiones más técnicas y simbólicamente densas dentro del diseño vitivinícola contemporáneo. Estas propuestas trasladan al plano visual y lingüístico la lógica de las geociencias, sus métodos, escalas temporales y vocabulario especializado, para reforzar la idea del vino como producto de un territorio con historia profunda y estructura física particular.

Abarca metáforas visuales, cosmologías, mitologías de la Tierra, representaciones celestes y recursos simbólicos vinculados a la naturaleza en las subcategorías: Cosmos & Planetas, Alegóricas o Simbólicas.

Etiquetas Alegóricas, Simbólicas o Abstractas (10)

En este tipo de etiquetas, la geología deja de representarse de forma literal y se reinterpreta de forma poética o simbólica. Los nombres como Aterra, Gaia, Iapetus, Lithos, Pangea, Phoebus, Telurian, Terra, Tantalus, Vulcano, evocan la tierra primigenia, los continentes desaparecidos y la materia mineral como símbolo de origen y profundidad.

Los diseños recurren a abstracciones cromáticas, trazos que recuerdan relieves o fracturas, y recursos propios del arte contemporáneo. Más que describir un suelo específico, construyen una identidad emocional del terroir: el vino como producto surgido del tiempo primitivo del planeta, donde la tierra es a la vez soporte físico y símbolo de autenticidad y permanencia.

Cosmos y cuerpos celestes (18)

Estas etiquetas trasladan la narrativa del vino desde la geología hacia una dimensión astronómica y universal, en la que el origen de la materia y los procesos de transformación cósmica se asocian a la creación del vino. Entre las denominaciones encontradas tenemos: Celeste, Cósmico, Eclipse, Estrellas fugaces (shooting stars), Gravedad, Lunas, Lunar, Mercury, Meteoro, Meteorito, Orbis, Planeta, Sideral, Satélite, Supernova, Tethys, Terrícola, Cosmos.

Desde una perspectiva técnica aluden a la afinidad entre la Tierra y los cuerpos planetarios, evocando la idea de que el vino comparte el mismo origen elemental que el cosmos. En el plano simbólico, representan ciclos de energía y renovación, comparando la fermentación, maduración o envejecimiento del vino con los procesos térmicos, orbitales o de impacto meteorítico que moldean los cuerpos celestes. Los diseños emplean motivos astrales (cráteres, constelaciones, eclipses, nebulosas), acompañados de paletas metálicas o lumínicas (azules, plateados, dorados), generando una atmósfera de profundidad y trascendencia.

En síntesis, las etiquetas de inspiración cósmica proyectan una lectura del vino como materia universal animada por la energía estelar, una metáfora visual del vínculo entre el microcosmos del terroir y el macrocosmos del universo.

LAS ETIQUETAS GEOLÓGICAS EN CIFRAS

Existen muy pocos estudios que ofrecen datos sobre el uso de referencias geológicas en etiquetas de vino, aunque no abundan estadísticas globales completas. Villier (2021) del análisis de 185.830 vinos, encontró que 9402 (5%) presentan referencias geológicas en sus nombres. Predominan los términos ligados a las propiedades y características del suelo (82,8%), especialmente los que aluden a gravas y piedras (graves, cailloux, grès, silex, etc.). La litología del sustrato (grava, esquisto, arena, caliza, arcilla, peridotita, dacita, dolomita, travertino) aparece en un 14,3% y las menciones paleontológicas o estratigráficas

son escasas (2,2%). El término más usado es gravas (graves), típico de Burdeos, asociado a depósitos aluviales.

En este estudio se analizó una muestra de 480 etiquetas de vino con motivos, ilustraciones o denominaciones de inspiración geológica, recopiladas a partir de sitios web, folletos y archivos fotográficos personales. Los resultados indican que tres grandes bloques dominan el análisis: ambientes depositacionales y procesos geológicos; petrología y minerales; y paleontología.

La temática más representada es la de ambientes depositacionales y procesos geológicos con 145 menciones (30.2%), seguida por los materiales geológicos (minerales y rocas) con 138 menciones (28.8%) y luego por los motivos paleontológicos, con 72 alusiones (15.0%). En su conjunto suman el 74% del total general.

En cuanto a las subcategorías, las etiquetas que incluyen diseños, tipografías o imágenes de minerales son las más numerosas, con 53 alusiones (11.0%). Si se le suman las subcategorías de gemas y minerales críticos, alcanzaría 94 menciones. Les siguen las relacionadas con fósiles o paleontología, que registran 42 menciones (8,8%), siendo los amonites y los dinosaurios los fósiles más representados. Por último, las etiquetas asociadas a geología estructural y geodinámica aparecen 35 veces (7,3%). Las etiquetas de ambientes sedimentarios y volcanes son mencionadas 28 (5.8%) y 27 veces (5.6%), respectivamente.

La fuerte presencia de fósiles, volcanes y minerales sugiere que las etiquetas buscan estetizar la geología, recurriendo a imágenes llamativas, reconocibles y cargadas de simbolismo.

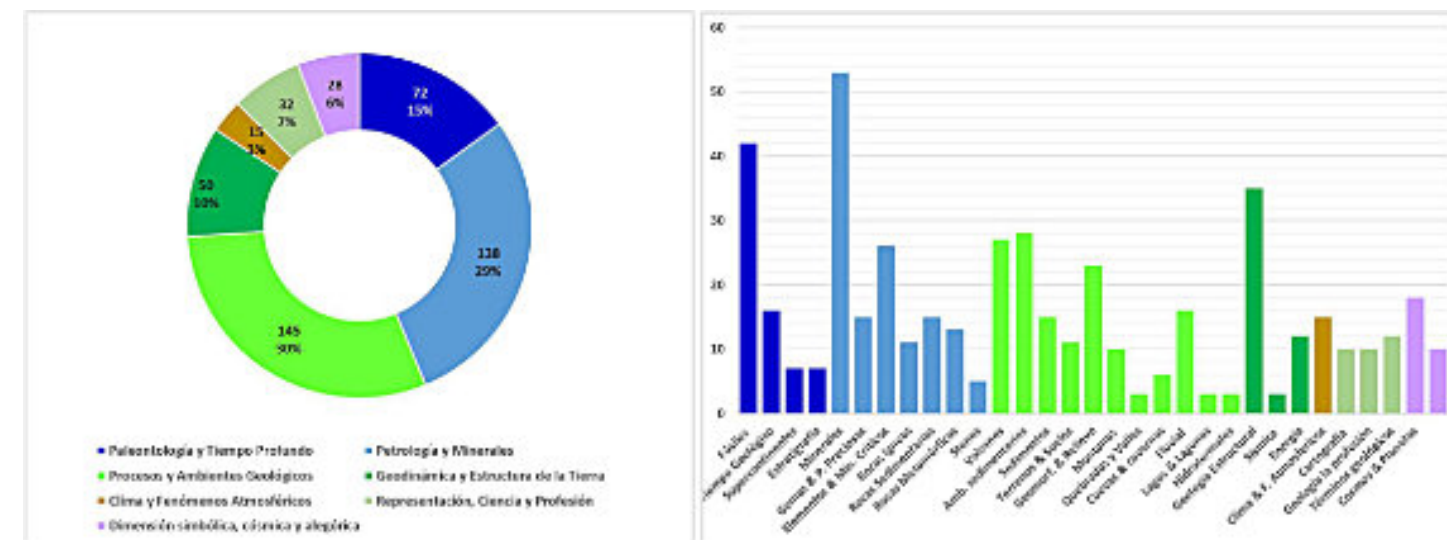


Figura 16. (Izq) Gráfico circular de recurrencia y distribución porcentual de categorías o grupos (Der) Gráfico de barras mostrando distribución de motivos, ilustraciones o denominaciones en etiquetas de inspiración geológica de en subcategorías.

CONCLUSIONES

Las etiquetas con motivos geológicos contribuyen a comunicar el carácter del terroir de manera visual y directa. La conversión de rocas, paisajes y procesos naturales en imágenes, transmite origen, autenticidad y una identidad ligada al territorio. Este recurso combina ciencia, arte y marketing, y además acerca la geología al consumidor al representar de forma sencilla la historia y las cualidades físicas del lugar donde nace el vino.

El análisis de 480 etiquetas revela una notable diversidad de motivos geológicos aplicados al diseño y a la comunicación visual del vino. Algunas categorías aparecen con mayor frecuencia, lo que indica cuáles resultan más

atractivas, reconocibles o efectivas desde el punto de vista comercial.

Los resultados muestran que el uso de referencias geológicas no es un fenómeno marginal, sino una estrategia extendida en distintas regiones vitivinícolas. Aunque la muestra representa solo una parte del total existente, incluye vinos de numerosos países y estilos, lo que evidencia la amplitud cultural y estética de estas representaciones.

La variedad de enfoques: minimalistas, figurativos, simbólicos, técnicos o tradicionales, demuestra que la geología puede integrarse en diferentes lenguajes gráficos sin perder su capacidad de expresar origen y singularidad.

Finalmente, la inclusión de múltiples categorías temáticas (paleontología, minerales, geodinámica, clima, paisajes y motivos simbólicos) permitió comparar representaciones diversas, identificar patrones visuales comunes y reconocer cómo la geología se convierte en una herramienta eficaz para narrar el terroir.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE IMÁGENES

Las ilustraciones incorporadas en este documento tienen una función estrictamente informativa. Todas pertenecen a sus respectivos autores, bodegas o diseñadores. Este trabajo no reclama propiedad intelectual sobre ellas y su uso se limita al análisis crítico y académico, sin fines comerciales.

REFERENCIAS Y CONSULTAS

- Astudillo-Pombo H. (2017) Folklore de los fósiles ibéricos (<https://folklore-fosiles-ibericos.blogspot.com/2017/08/marquetin-enologia-y-registro-fosil-12.html>)
- Astudillo-Pombo H. (2012). Registro fósil y comercialización vinícola, en la Europa extra-ibérica (Primera parte). Introducción al uso publicitario del registro fósil, como emblema vinícola en Márquetin, Enología y Paleontología (1) Glossopetrae (<https://glossopetrae.blogspot.com/2012/05/marquetin-enologia-y-paleontologia-1.html?m=1>)
- Dunning N.P. & Gemmer W. (2019). Geographic Language of Wine Labels: Libations, Land, and Labels. Springer Nature Switzerland AG 2019 S. D. Brunn, R. Kehrein (eds.), Handbook of the Changing World Language Map, https://doi.org/10.1007/978-3-319-73400-2_212-1
- Fernández Portela, J. (2019). Las etiquetas de las botellas de vino: su valor como recurso comercial y como expresión del paisaje vitivinícola. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 81, 2759, 1–33. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2759>
- <https://geografiadelvino.com/2021/04/26/vinos/> acceso 19/11/2025

Glossopetrae Blogspot

(<https://glossopetrae.blogspot.com/2012/05/marquetin-enologia-y-paleontologia-1.html?m=1>)

Maltman, A. (2018). Vineyards, rocks, and soils: The wine lover's guide to geology. Oxford University Press.

Villier L. (2021). The place of geology in the French wine business: preliminary investigation by exploring information from wine labels. Géologie de la France, n° 3, 2021, p. 32-45, 2 fig., 4 tabl., 1 app.

The World of Fine Wine (2015) Wine and the Mists of the Distant Past: Geological Time Explained <https://worldoffinewine.com/uncategorized/wine-and-the-mists-of-the-distant-past-geological-time-explained-4712624>

van Leeuwen, C., & Seguin, G. (2006). The Concept of Terroir in Viticulture. Journal of Wine Research, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/09571260600633135>

Wilson, J. E. (1998). Terroir: the Role of Geology, Climate, and Culture in the Making of French Wines. University of California Press.

Wilson J.E. (2001). Geology and Wine 4. The Origin and Odyssey of Terroir. Geoscience Canada, Volume 28, Number 3 September 2001, p 139-141.

SOBRE EL AUTOR:



Jesús S. Porras M. es Ingeniero Geólogo con Maestría en Ciencias Geológicas y amplia experiencia en exploración y desarrollo de reservorios. Actualmente es Geólogo Consultor Senior y lidera estudios integrados de yacimientos convencionales y no convencionales para diversas operadoras.

Interesado en patrimonio geológico y comunicación en geociencias, ha participado en más de 70 publicaciones y presentaciones profesionales.

INYECCIÓN SOMERA DE AGUAS PRODUCIDAS DE YACIMIENTOS DE PETRÓLEO: 1. ACEPTABILIDAD AMBIENTAL DEL SISTEMA ACUÍFERO

Leslie F. Molerio León

INVERSIONES GAMMA, S.A.,
Apartado 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba;
especialistaprincipal@gmail.com; ORCID 0000-0001-9667-2258

RESUMEN

La posibilidad de utilizar pozos de inyección con baja o nula presión para la disposición final de aguas de capa tratadas de yacimientos gasopetrolíferos onshore de la Franja de Crudos del Norte de La Habana-Matanzas (FCP) es una alternativa viable utilizando el acuífero cársico litoral somero carsificado salinizado por intrusión marina con mineralizaciones superiores a los 10000 mg/L que se extiende a lo largo del litoral donde tienen lugar las operaciones gasopetrolíferas. Esta alternativa representa un cambio rotundo en la matriz de disposición final de las aguas de capa tratadas y su implementación estaría en dependencia de la aceptabilidad ambiental del acuífero para recibir determinados volúmenes de las aguas tratadas que se basa en el Modelo de compatibilidad de las aguas subterráneas de acuíferos cársicos litorales someros para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados fundamentada en la Teoría de la Interacción Iónica Pitzer, en la Teoría de los Miembros Terminales de las Aguas Terrestres de Cuba y en un conjunto de propiedades físicas, hidráulicas, geoquímicas e hidrodinámicas del acuífero. La aplicación de un modelo analítico del tipo advectivo-dispersivo en 2D ha permitido conocer la forma y extensión de la pluma de dispersión, de un grupo selecto de contaminantes conservativos que se pretende inyectar en un acuífero cársico costero somero salinizado. Los contaminantes provienen de las aguas producidas de los yacimientos gasopetrolíferos carbonatados y deben alcanzar el umbral de sensibilidad impuesto por la Legislación Ambiental Cubana, por lo que presentan diferentes factores de dilución que restringen el alcance máximo de la pluma para los diferentes periodos de inyección continua simulados. Por su parte, las particularidades hidrogeológicas del acuífero permiten asimilar la carga química a inyectar permitiendo la disipación del impulso, mientras las dispersividades calculadas definen el destino y forma de la pluma contaminante. Los resultados permiten concluir que es factible la inyección de las concentraciones propuestas, pues el caso más crítico (20 años de inyección constante sin degradación ni retardo) alcanza el umbral de sensibilidad ambiental a distancias de 10 metros (Pb, Cu,) y 250 y 330, para el Cd y el V respectivamente, en un acuífero donde los tiempos de transito estimados –hasta el momento- son del orden de los 6,5 años.

INTRODUCCIÓN

La producción de petróleo y gas va acompañada de la producción de agua. Esta, así llamada, *agua producida* está compuesta por el *agua de formación o de capa*, que es la que está presente naturalmente en el horizonte productivo, y del *agua de inundación* que, eventualmente, se inyecta a la formación para procesos de recuperación secundaria de petróleo. En tanto progresa la explotación del yacimiento, la cantidad de agua producida se incrementa. En consecuencia, su gestión requiere una aproximación estructurada e integral que considere un amplio rango de tecnologías y estrategias, como las de separación, por ejemplo, y a las que se integra la disposición en cualquiera de sus dos grandes variantes: descarga directa o inyección.

La selección de una de ellas viene definida por lo que se considera el punto clave de la disposición del agua producida; a saber, la gestión de su movimiento y destino final y la evaluación de los efectos en el ambiente que las recibe. A esto se le añade que el método que se seleccione como el adecuado deberá subordinarse a las regulaciones ambientales que apliquen en cada caso.

En yacimientos onshore y en ambientes sensibles próximos a la costa o a las riberas de los ríos, la inyección (o el vertimiento) es el método de disposición frecuentemente adoptado. En tales casos, uno de los puntos centrales a aclarar es el grado de confinamiento que puede exhibir un cierto estrato receptor a las aguas producidas inyectadas. Esto se conoce como aceptabilidad ambiental del proceso de disposición.

La inyección se puede hacer en la matriz o en fracturas de las rocas y no es un secreto que resulta más compleja operacionalmente que cualquier otro método de disposición. En previsión de contingencias, la buena práctica indica que se deben considerar un grupo de métodos adicionales de disposición que, en el caso que nos ocupa, se reducen a:

- ☐ El uso de pozos de inyección alternativos (los llamados stand-by wells)
- ☐ Descarga en la superficie, en correspondencia con las regulaciones ambientales
- ☐ Descarga en cuerpos de agua dulce, en correspondencia con las regulaciones vigentes
- ☐ Almacenamiento en las instalaciones, comúnmente en tanques
- ☐ Confinamiento en pozos liquidados o abandonados

Una alternativa común es la inyección en el horizonte productivo de petróleo para contribuir a mantener la presión de campo en el yacimiento y contribuir a acelerar el flujo de petróleo a los pozos productores. Esta práctica, común en los campos petroleros, no se considera un método de disposición por entidades reguladoras tan importantes como la International Association of Oil & Gas Producers.

La primera de las alternativas es la que resulta más competitiva económicamente en términos de operación. Sobre todo, cuando se supone que sea *posible inyectar en pozos someros donde la presión de inyección sea baja*. Pero en cualquier alternativa de inyección es imprescindible identificar una serie de propiedades contextuales entre las cuales, la más importante, es la compatibilidad geoquímica y física de las aguas producidas con el medio acuífero, especialmente la compatibilidad de tipo hidráulico (Laaksoharju, Degueldre y Skarman, 1995; Koretsky, 2000).

En cualquier caso, como aspecto fundamental es necesario tener en consideración que las aguas de capa son aguas altamente salinizadas que, en algunos casos pueden constituir verdaderas salmueras (las llamadas salmueras de petróleo, que pueden tener hasta 100 000 mg/L de Sales Solubles Totales). La salinidad varía en dependencia del origen del petróleo, la litología del horizonte productivo, incluyendo la cercanía a estructuras diapíricas y la profundidad de yacencia. El proceso de maduración y el tiempo de contacto agua – roca son también factores importantes. Adicionalmente, las aguas de capa o producidas pueden tener niveles elevados de metales traza, sulfuros, azufre elemental, hidrocarburos de petróleo y sustancias orgánicas parcialmente oxidadas. La mayor parte de ellas deben ser removidas para ser aceptadas ambientalmente en el entorno donde serán dispuestas (Fig. 1).

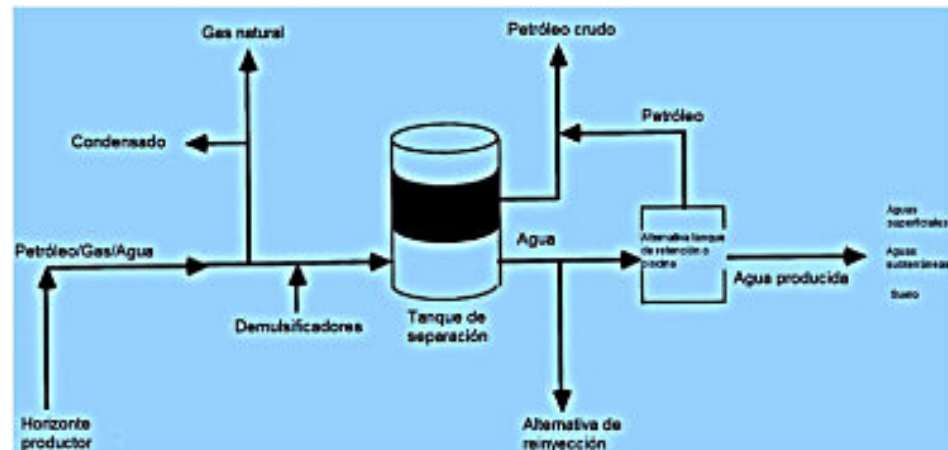


Fig. 1. Procedimientos de separación, tratamiento y disposición final de aguas producidas (Modificado de Boesch y Rabalais, 1989).

El agua debe ser eliminada totalmente del petróleo y el gas para permitir el transporte y uso del petróleo. Convencionalmente se emplean técnicas de despresurización y separación gravitacional para ello y, por lo común se aplican demulsificadores para acelerar el proceso. Una vez que el contenido de agua alcanza valores aceptables este efluente se devuelve al yacimiento, específicamente al horizonte productivo en caso que contribuya a mantener la presión

de capa, a éste u otro horizonte donde ello no es posible o se descarga a las aguas superficiales, al terreno o a las aguas subterráneas. Este es el caso estudiado en nuestro modelo bajo la condición adicional que demuestre su compatibilidad geoquímica con horizontes acuíferos someros carsificados salinizados.

La aceptabilidad ambiental de la inyección somera, está definida como la capacidad del sistema hidrológico natural para asimilar –mediante mezcla o dilución– aguas externas con determinada composición física y química de manera que los compuestos resultantes no alteren la organización y dinámica del sistema de flujo en términos de la estructura del campo de propiedades físicas del acuífero, las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las aguas que afecten el flujo natural, el intercambio entre diferentes sistemas de flujo y otras masas de agua ni la biota asociada al ecosistema. Ella se expresa en los siguientes indicadores:

- ☐ Compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y los fluidos del horizonte receptor
- ☐ Compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y la litología de las zonas de inyección y los sellos o capas confinantes
- ☐ La capacidad calorífica del agua producida a inyectar
- ☐ La concentración de los hidrocarburos dispersos y la distribución de los particulados y los sólidos suspendidos de las aguas a inyectar
- ☐ Capacidad del horizonte acuífero para asimilar los caudales y la carga química de las aguas producidas a inyectar
- ☐ La identificación de un tiempo de tránsito aceptable para las aguas de mezcla que garantice la protección que fijen las regulaciones ambientales
- ☐ Propiedades agresivas o incrustantes de la mezcla de agua resultante

Resueltos los problemas de tipo hidrodinámico y geoquímico antes descritos se pasa a la segunda fase, que es la construcción de los pozos de inyección. Esto se logra mediante el adecuado rimado (ampliación de diámetro), cementación, instalación de filtros y desarrollo de los pozos que se proyecten. Esto es tan importante como todo lo anterior porque resulta la solución ingeniera del problema de la disposición final.

Entre los parámetros de diseño, además de la profundidad de los pozos y la distribución de anillos, filtros, camisas ciegas y otro tipo de entubado, así como la cementación y los colchones eventuales de grava, tenemos los siguientes:

- ☐ Máxima tasa de inyección.
- ☐ Máxima presión prevista de inyección.
- ☐ Temperatura de inyección del fluido.
- ☐ Composición físico química y propiedades termo hidrodinámicas del fluido de inyección.
- ☐ Volúmenes de inyección.

Además, es necesario velar por conservar dentro de los límites aceptables, los siguientes temas que también hay que estudiar a partir de la data hidrogeológica:

- ☐ La corrosión que puede producir el fluido a inyectar.
- ☐ La reducción del colapso de las camisas debido a la tensión y compresión.
- ☐ La eficiencia de los sellos respecto a los efectos de expansión y contracción del entubado debido al eventual ciclo térmico que pudiera estar involucrado.
- ☐ La fracturación hidráulica de la capa confinante, que depende de la presión ejercida por el líquido de inyección.
- ☐ El radio de influencia del volumen inyectado.

ANTECEDENTES: DESARROLLO DEL MODELO

En los últimos años, hemos trabajado en el desarrollo de una tecnología para disponer mediante inyección o descarga libre las aguas producidas, basada en una adaptación de los principios de la Teoría de Pitzer (1979, 1987, 1991) sobre transporte reactivo en salmueras de petróleo y marinas, básicamente en ecotonos de interface tierra-oceano pero que, por la física del proceso pueden evaluarse también en ambientes de este tipo en zonas de tierra adentro (Molerio, 2015,

2017a, 2019a, 2019b, 2019c, 2020a, 2020b, 2021a, 2021b; Farfán y Molerio, 2020). La utilización de pozos someros en acuíferos cársicos salinizados y poco productivos para sustituir la inyección profunda, minimizar los costes energéticos y maximizar las operaciones de vigilancia y control ambiental ha sido un resultado prometedor de la aplicación de esta tecnología.

Los fundamentos teóricos que han sustentado el desarrollo del modelo teórico y luego, su ensayo en un sector de la Franja de Crudos del Norte de La Habana-Matanzas parten de la identificación de patrones de la composición química e isotópica de las aguas subterráneas de Cuba y la caracterización y desarrollo de la metodología para la caracterización de los miembros terminales de las mismas desarrollado por el autor en 1991 (Molerio, 1992a). En 2001 se evaluó por primera vez la aplicación de la Teoría de las Interacciones Iónicas de Pitzer (1979 y ss) a la solución la inyección de aguas de capa producidas en el yacimiento Boca de Jaruco, al oeste de La Habana y, en 2003, del problema de la disposición final de las aguas de sentina en la Base de Supertanqueros de Matanzas. En 2005 se evaluó como alternativa en Puerto Escondido simultaneada con la solución de conflicto de abasto con el Campismo Popular.

La posibilidad de utilizar pozos someros en acuíferos cársicos salinizados y poco productivos para sustituir la inyección profunda, minimizar los costes energéticos y maximizar las operaciones de vigilancia y control ambiental ha sido estudiada sistemáticamente por el coautor Molerio y, en varias publicaciones se han fundamentado y descrito los principios de la metodología aplicada a la solución de estos problemas, basada en una adaptación de los principios de la Teoría de Pitzer sobre transporte reactivo en salmueras de petróleo y marinas, básicamente en ecotonos de interface tierra-océano pero que, por la física del proceso pueden evaluarse en ambientes de este tipo en zonas de tierra adentro.

En la aplicación de esta técnica ha sido necesario resolver un grupo importante de problemas teóricos y de su aplicación ingeniera, tales como, la transferencia de calor en el dominio de flujo y la respuesta agua-roca, la organización del flujo en sistemas gobernados por la densidad, los típicos problemas de corrosión-sedimentación en las tuberías y sistemas receptores y de ductos en general, la propagación de la eventual carga contaminante (macroconstituyentes, metales y microelementos), el transporte de masa, momento y energía, con particular atención a los de transporte e intercambio de calor mencionados, los derivados de la eventual ausencia de capas confinantes que pudieran actuar como sellos en los acuíferos someros. En atención a ello, y por la naturaleza geológica de Cuba (Figs 2 y 3) se ha ido desarrollando esta aplicación orientada para acuíferos cársicos someros, con epikarst bien desarrollado y cavidades embrionarias en la zona no saturada, buscando la definición óptima de la profundidad de vertimiento (no inyección) de las aguas de capa tratadas y el ajuste de normativas legales respecto de la calidad final de las aguas a disponer.



Fig. 2. Distribución del karst en Cuba.



Fig. 3. Karst litoral en la Franja de Crudos Habana-Matanzas, una de las zonas más importantes de exploración y extracción de petróleo y gas del Norte de Cuba (Foto del autor).

El propio desarrollo de los algoritmos y el ensayo sistemático de la tecnología que los aplica han permitido su extensión a medios porosos no necesariamente anisotrópicos y heterogéneos como el karst, sino en aquellos donde las condiciones iniciales y de borde se cumplan, incluso en medios porosos granulares. Especialmente importante ha sido la determinación de los tiempos de residencia del nuevo flujo multifásico (o polifásico) y de los procesos complementarios de saturación-insaturación de las nuevas soluciones a lo largo de las líneas de flujo interesadas por la disposición somera (Fournier et al., 2007).

Los algoritmos desarrollados, derivados o aplicados para solucionar este problema han sido validados en casos reales en dos condiciones extremas: a) para descargas submarinas en mar abierto y b) para acuíferos carbonatados libres y semilibres salinizados con o sin presencia cercana de interface tierra-océano y componente periódica de marea e intrusión marina, en un intento por armonizar políticas ambientales y políticas económicas que garanticen un desarrollo no antagónico entre ambos extremos de actividad social, cultural y económica. Bajo determinados esquemas de organización y de relación Academia-Gobierno-Comunidad-Consultor con los operadores de las compañías gasopetrolíferas se ha podido avanzar en la consideración y la implementación de este propósito. La incuestionable necesidad de garantizar el abastecimiento energético del país, pero balanceado con la sostenibilidad necesaria de otras áreas de valor económico, ambiental y social han primado en estas investigaciones.

La demanda de una solución a los excedentes de agua de capa viene dada por:

- ☐ Necesidad de disponer los volúmenes crecientes de agua de capa tratada, que no volverían al yacimiento por razones geológicas y tecnológicas.
- ☐ Reducir los costos de operación asociados con el gasto energético de la inyección en profundidad
- ☐ Minimizar la posibilidad de fluencia de agua de los pozos de inyección a los productores
- ☐ Disminuir la posibilidad de intercambio inducido entre las capas productoras de petróleo y gas
- ☐ No crear pasivos ambientales adicionales y, por el contrario, aprovechar las aguas salinizadas improductivas y el ecotono litoral como sistema de disposición final autorregulado.

El perfeccionamiento del método ha pasado por dos grandes etapas de desarrollo de investigaciones de base que condujeron a los resultados que aquí se resumen.

Así, entre 1991 y 1992 (Molerio, 1992a) y actualizados en 2020, se desarrollaron los primeros estudios de tipificación generalizada de la composición química e isotópica de las aguas subterráneas de Cuba y la identificación de los miembros terminales y de transición de las aguas terrestres. Ya entre 2000 y 2001, ante el auge de la exploración y producción

petrolera en Cuba se desarrollaron investigaciones particulares en algunos yacimientos para definir la compatibilidad geoquímica entre algunos tipos de aguas y sus indicadores característicos; particularmente en el caso de la interacción de flujos multifásicos y polifásicos.

Entre 2004 y 2011 se desarrolló la aplicación de la Teoría de las Interacciones Iónicas de Pitzer al caso particular de las aguas de capa cubanas y se tipificaron aquellos factores de control geológico e hidrodinámico de la inyección en aguas subterráneas salinizadas someras en acuíferos cársicos costeros, evaluándose las condiciones de borde para su aplicación. En 2009-2010, la Inyección Somera en la acepción de nuestra metodología, se incluyó en las iniciativas de la agencia reguladora ambiental, el Centro de Inspección y Control Ambiental de la República de Cuba, como un recurso ingeniero a ser considerado en la preparación de la documentación de las solicitudes de licencia ambiental de algunos yacimientos en el tema de la disposición final de las aguas producidas, por lo que ya, en 2013, la oficina reguladora fue consultada sobre las eventuales restricciones que se impondrían a la inyección de aguas de capa tratadas en acuíferos cársicos someros costeros salinizados, básicamente para resolver un problema de la inundación de los pozos de algunos yacimientos. Para la fecha, y en un proyecto específico de inyección somera, se dispuso por primera vez de los umbrales de sensibilidad ambiental de ciertos constituyentes físico y químicos de las aguas de capa tratadas para aprobar la inyección somera. El órgano rector de la exploración gasopetrolífera en Cuba, CUPET, también emitió en su momento, su Visto Bueno para emprender los estudios de Factibilidad Ambiental de la Inyección Somera, en otro de los yacimientos.

La presencia de salmueras de petróleo, atípicas por provenir de yacimientos carbonatados, condujo a la aplicación de la Teoría de las Interacciones Iónicas de Pitzer para estudiar, en modelos naturales, la evolución de las fases y su aceptabilidad en acuíferos reales altamente salinizados. En esa época, el tipo geoquímico “Aguas de Capa” pudo ser definido con elevada certidumbre estadística e incluido en el Nomograma de Miembros Terminales y de Transición que ya había utilizado como base, el nomograma clásico de Schoeller adaptado por nosotros a tales efectos a principios de los años 90 pasados.

El diseño, operación y optimización de redes de monitoreo de las aguas terrestres y marinas en algunos yacimientos gasopetrolíferos del Occidente de Cuba condujo a la precisión de los factores de control geológico e hidrodinámico, en particular de la hidrodinámica geoquímica y a la elaboración y ajuste de los algoritmos para la simulación matemática de los procesos de mezcla de soluciones electrolíticas fuertes (disolución, precipitación y otros) en acuíferos someros costeros altamente salinizados, que se apoyaron también en experimentos de banco con mezclas de aguas reales. Así, ya en 2014, la metodología básica se inscribió en el Centro Nacional de Derecho de Autor de la República de Cuba (Registro 1439-05-2014).

El ajuste sistemático para definir la factibilidad ambiental de la solución propuesta se desarrolló en paralelo, contando con la buena disposición de operadores de petróleo en Cuba. Por razones basadas en los acuerdos de confidencialidad con los clientes, mucha de esta información permanece inédita, pero puede mencionarse que ya en 2001 fue presentado como una aproximación a la solución de la inyección de aguas de capa en el Yacimiento Boca de Jaruco; en 2004 fue identificada la inyección somera como una alternativa ingeniera a la construcción de un emisario submarino en uno de los yacimientos costeros pero, la propia disposición en el mar, permitió evaluar la validez del método en cuerpos abiertos de salinidad elevada, superior a la de los acuíferos hasta ese momento evaluados. Al año siguiente, fue considerada como opción para la solución de un conflicto de uso de agua y luego, en 2007, como una elección independiente para disponer aguas de capa en ese yacimiento. Desde entonces se han continuado estudios exitosos con este fin. La extensión del método a yacimientos costeros en algunos yacimientos análogos con necesidades semejantes de la Cuenca del Caribe está siendo considerada actualmente.

REQUISITOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA

La disposición fina de aguas producidas de los yacimientos gasopetrolíferos mediante inyección somera de aguas en acuíferos cársicos someros salinizados es hidrogeológicamente factible en tanto se cumplan un grupo de condiciones de contorno del medio físico de las cuales pueden citarse las siguientes como las más importantes:

Rango de aplicación

- ☐ Yacimientos gasopetrolíferos carbonatados, preferentemente paleokarsts.
- ☐ Aguas de formación que no constituyan verdaderas salmueras de petróleo.
- ☐ Acuíferos cársicos litorales conformes o contrarios o epikarsts.
- ☐ Elevado tiempo de residencia de las aguas, preferentemente desvinculadas del ciclo hidrológico actual.
- ☐ Cuerpos receptores constituidos por sistemas de flujo locales bien diferenciados, preferentemente aparatos cársicos semiconfinados o semilibres.

Propiedades del cuerpo receptor

- ☐ Compatibilidad agua subterránea-roca-agua de formación-agua de mar.
- ☐ Adecuada capacidad de absorción.
- ☐ Baja capacidad transmisiva y alto almacenamiento.

La correcta aplicación del modelo se basa en la observancia estricta de los siguientes procedimientos:

En las aguas de capa

1. Identificación del volumen y caudal del agua de capa.
2. Caracterización física, química e isotópica con fraccionamiento isotópico del tipo de salmueras o de evaporación en cuencas cerradas (Barrazán et al., 2001).

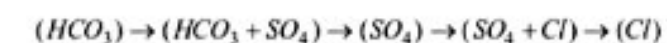
En el cuerpo receptor

1. Caracterización física, química e isotópica de las aguas subterráneas.
2. Identificación en el epikarst y en el acuífero, de las propiedades inerciales y autorreguladoras del karst litoral (Molerio, Guerra y Leal, 2013).
3. Identificación del tiempo de residencia de las aguas.
4. Identificación de la compatibilidad agua de formación-roca-agua subterránea-agua de mar.

En el sistema de tratamiento, recarga y control

1. Capacidad tecnológica, ambiental y financiera (costos capitales y de operación) para satisfacer las restricciones ambientales que imponga la autoridad ambiental.
2. Capacidad tecnológica para satisfacer la compatibilidad agua de formación-roca-agua subterránea.
3. Diseño, construcción y ensayo del sistema de absorción o recarga.
4. Diseño, construcción del sistema de monitoreo.
5. Operación del sistema (tratamiento-inyección-monitoreo)

La aplicación del modelo, como solución al problema de la disposición final de las aguas de capa tratadas tienen parte de su basamento en la estructura y variabilidad de los patrones geoquímicos de las aguas terrestres cubanas que se deriva de la Teoría de los Miembros Terminales de las Aguas propuesta por el autor en 1992 como resultado de un estudio sobre la composición química e isotópica de las aguas de lluvia de Cuba (Molerio, 1992a). Toma parte de su basamento en la revisión de la Secuencia General de Chebotarev propuesta por este autor en 1955, que se expresa como y describe el cambio general de composición química de las aguas terrestres, particularmente las subterráneas desde las fuentes de alimentación hasta el mar:



Los miembros terminales cuya composición genérica en macroconstituyentes y sales disueltas totales se muestra en la Fig. 4 fue obtenida mediante el procesamiento estadístico de varios miles de muestras de aguas terrestres, de lluvia y marinas entre 1974 y 1992 que se publicó originalmente. Con los años se ha ido adecuando incorporando nuevos

miembros y, como es el caso de este artículo, se ha insertado en ellas la composición estandarizada de varios cientos de muestras de aguas de capa de la Franja Norte de Crudos Habana-Matanzas. Los estudios preliminares desarrollados por el autor respecto a la compatibilidad entre las aguas de capa y las de los acuíferos litorales cársicos salinizados por intrusión marina demostraron que existe buena compatibilidad entre ellas (Molerio, 2020a, 2020b, .

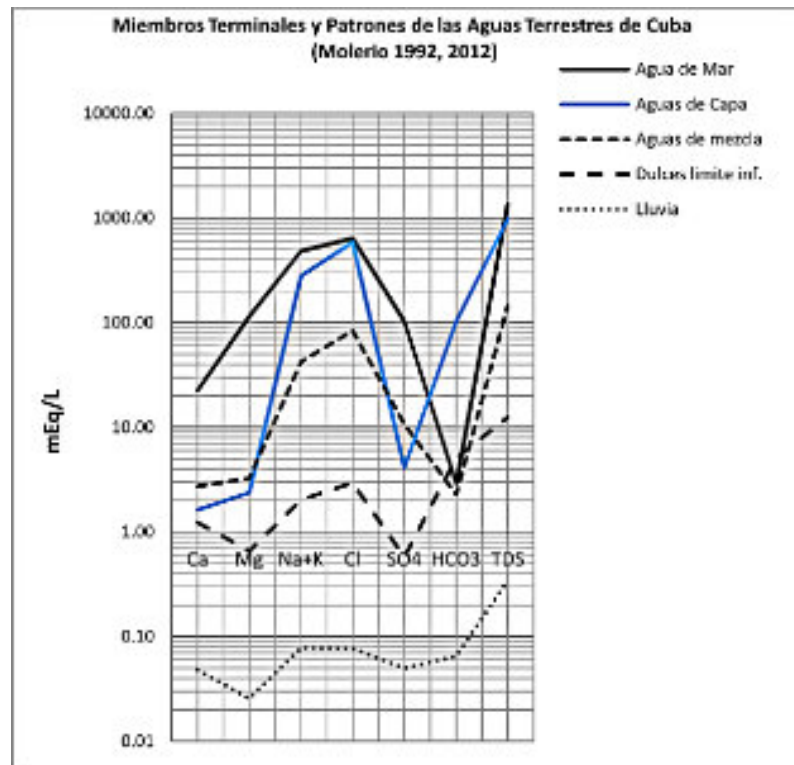


Fig. 4. Miembros terminales de las aguas cubanas (según Molerio, 1992a, 2012).

El sistema multicomponente agua subterránea de diferente salinidad, agua de capa, agua producida tratada y agua de mar presenta afinidad y compatibilidad geoquímica. Este tipo de procesos de intercambio constituyen un grupo particular de procesos superficiales en los que, de nuevo, las interacciones electrostáticas entre los iones disueltos y las superficies sólidas cargadas juegan un papel fundamental. En los procesos de intercambio un ión asociado a una superficie es reemplazado por otro ion procedente de la solución acuosa. Por ello, pueden contemplarse como una combinación de fenómenos concatenados de adsorción y desorción.

Pese a esta mayor complejidad respecto a los aparentemente “más simples” procesos de adsorción o desorción, los procesos de intercambio iónico son tratados mediante leyes de acción de masa, con sus constantes de equilibrio correspondientes, sin considerar correcciones electrostáticas. Este tratamiento es, en principio, similar al empleado con los procesos de disolución-precipitación mineral. No obstante, presenta una serie de aspectos distintivos que no conviene olvidar, ya que por un lado, no se dispone de ningún modelo riguroso con el que obtener las actividades de los iones situados en las posiciones de intercambio de la superficie, elementos que entran en las leyes de acción de masa de forma análoga a los iones en solución que intervienen en la reacción de intercambio. Por otro lado, las constantes de equilibrio de las reacciones de intercambio no son realmente constantes. Estas particularidades condicionan específicamente la metodología de trabajo con los procesos de intercambio y son las responsables de la existencia de distintos convenios para su tratamiento.

PROCESOS TERMODINÁMICOS

El **Modelo de compatibilidad de las aguas subterráneas de acuíferos cársicos litorales someros para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados** desarrollado teóricamente por el autor de

este artículo se basa, geoquímicamente, en el modelo de Pitzer o Teoría de Interacción Iónica (Pitzer, 1979, 1987, 1991) que es una profundización de la teoría de interacción específica propuesta por Bronsted, según el cual habrá interacción entre dos iones de signo opuesto y la interacción entre iones del mismo signo dependería exclusivamente de la carga eléctrica (Massei et al., 2007). El modelo de Pitzer, como un modelo de interacción, a diferencia de los modelos de asociación, es aplicable con gran éxito a solutos disociados, y las propiedades de las soluciones están descritas en términos de interacción entre iones libres pero, además, este modelo también considera las interacciones entre pares de iones del mismo signo y entre tripletas de iones (Amado y Blanco, 2010).

Aunque la anterior premisa es esencialmente correcta, no explica completamente los resultados experimentales. La base teórica del modelo de Pitzer propone que los iones del mismo signo tienden a permanecer alejados entre sí y por lo tanto, las fuerzas de corto alcance entre ellos tendrían muy pocas consecuencias. Al contrario, los iones de signo contrario se acercarían lo máximo posible y en consecuencia estarían afectados por las fuerzas de corto alcance. Además, las características de estas fuerzas de corto alcance serían específicas para cada par de iones. Entre los resultados más importantes está el reconocer la dependencia de la fuerza iónica del efecto de las fuerzas de corto alcance en interacciones binarias (Kim y Frederick, 1988a, 1988b).

Ecuación de Pitzer

La Ecuación de Pitzer se basa en una analogía entre los gases imperfectos y las soluciones de electrolitos que había sido demostrada en 1945 por McMillan y Mayer (Weber, 2000). Esos autores demostraron que la relación entre la presión osmótica de la solución y los potenciales medios de los solutos en el solvente era igual que la relación entre la presión de un gas y los potenciales entre las partículas (Van de Weerd, Leijnse y van Riemsdijk, 1998). Aunque para calcular distintas propiedades a partir de la presión osmótica es necesario hacer algunas correcciones, no desaparece la semejanza entre las soluciones no ideales y los gases imperfectos en relación con los respectivos potenciales.

$$PV = RT + BP + C'P^2 + D'P^3 + \dots$$

Donde el primer coeficiente virial corresponde al gas perfecto. El segundo coeficiente, B, de acuerdo con la mecánica estadística corresponde a las fuerzas intermoleculares entre los pares de moléculas; el tercer coeficiente corresponde a la interacción entre tres moléculas, etc.

El Modelo de Pitzer es un modelo de interacción y, a diferencia de los modelos de asociación, es aplicable con gran éxito a solutos disociados ya que las propiedades de las soluciones están descritas en términos de interacción entre iones libres; pero, además, este modelo también considera las interacciones entre pares de iones del mismo signo y entre tripletas de iones.

De acuerdo con Amado y Blanco (2010) si la fuerza intermolecular entre un par de moléculas depende solamente de la distancia r y el potencial es $u(r)$, el segundo potencial o coeficiente está definido como:

$$B = 2\pi N_0 \int_0^\infty \left[1 - \exp\left(-\frac{u}{kT}\right) \right] r^2 dr$$

Donde N_0 es el número de Avogadro.

La ecuación de Pitzer tiene un parámetro electrostático (F), que es básicamente una modificación de la ley extendida de Debye-Hückel. El segundo coeficiente virial (B) corresponde a un coeficiente de interacción y su dependencia de la fuerza iónica (I) se ha derivado con base en los siguientes argumentos:

- ☐ B tiene un valor finito para I=0
- ☐ B varía de forma lineal con I a fuerzas iónicas pequeñas
- ☐ B es aproximadamente constante a fuerzas iónicas elevadas

El modelo de interacción de Pitzer está basado en la expresión de la energía libre de Gibbs de la solución de acuerdo con la ecuación de Debye-Hückel y en una expansión virial de las molalidades de las especies disueltas, que pueden ser iónicas o neutras. En la ecuación siguiente el coeficiente de actividad está dado como una sumatoria de una serie de potencias.

$$\ln \gamma_{\pm} = -\frac{A_m \frac{1}{2}}{1 + \beta_m \frac{1}{2}} + \sum_{i=1} B_i m_i$$

La ecuación de Debye-Hückel es una función de fuerza iónica mientras que la ecuación de Gibbs-Duhem es una función de la molalidad. La ecuación de Pitzer se propone como una consecuencia debida a la teoría de Debye-Hückel que es sólo aplicable a muy bajas concentraciones, por tanto, se adicionan una serie de términos *ad hoc* para tomar en cuenta las interacciones de corto alcance. Aunque Pitzer se basa en los parámetros teóricos aceptados por Debye-Hückel, su ecuación incluye términos de origen empírico.

Es así como la representación general de la ecuación de Pitzer asume que la energía de exceso de Gibbs está dada por:

$$\frac{G^R}{RTw_s} = f(I) + \sum_i \sum_j m_i m_j \lambda_{ij}(I) + \sum_i \sum_j \sum_k m_i m_j m_k \Lambda_{ijk}$$

La función f(I) depende de la fuerza iónica, la temperatura y las propiedades del solvente. Este término representa las fuerzas de largo alcance e incluye la ley límite de Debye-Hückel. El parámetro $\lambda_{ij}(I)$ representa las interacciones de corto alcance entre dos partículas de soluto en el solvente; la dependencia de la fuerza iónica de este término permite la convergencia en la expansión virial. Este parámetro $\Lambda_{ijk}(I)$ contiene las interacciones de tipo triple y son importantes sólo para altas concentraciones de soluto. A concentraciones aún mayores se requieren de más de cuatro parámetros. El modelo de Pitzer para las ecuaciones de los coeficientes osmótico y de actividad contiene los parámetros de interacción catión-anión (ca) que son funciones de la presión y la temperatura:

$$\beta_{ca}^0, \beta_{ca}^1, \beta_{ca}^2, C_{ca}$$

Sin embargo, la ecuación de Pitzer puede utilizarse con los cuatro parámetros para una concentración alta, o con dos y tres parámetros para concentración baja. El tercer coeficiente virial (γ_{MXC}), incluye las interacciones entre iones del mismo signo, que se consideraban nulas en la teoría de interacción específica. Sin embargo, este término es despreciable y solo se tiene en cuenta para valores altos de fuerza iónica. La ecuación general de Pitzer modificada de acuerdo a Clegg y Whitfield (Yigui, 2006) para el coeficiente de actividad para un catión M y un anión X y del coeficiente osmótico es:

$$\ln \gamma_{\pm} = |z_+ z_-| F + m_c \left(\frac{2\nu_+ \nu_-}{\nu} \right) B_{cx}^r + m_c^2 \left(\frac{2(\nu_+ \nu_-)^{1/2}}{\nu} \right) C_{cx}^r$$

$$\ln \gamma_{\pm} = z_x^2 F + \sum_c m_c (2B_{cx} + ZC_{cx}^r)$$

$$\ln \gamma_m = z_m^2 F + \sum_a m_a (2B_{am} + ZC_{am}^r)$$

Donde:

$$F = -A_m \left[\frac{I^{1/2}}{1 + B_{ca} I^{1/2}} + \left(\frac{2}{B_{ca}} \right) \log_{10} (1 + B_{ca} I^{1/2}) \right]$$

$$B_{ac}^r = 2\beta^0 + \left(\frac{2\beta^1}{\alpha_i^2 I} \right) \left[1 - \left(1 + \alpha_i I^{1/2} - \frac{\alpha_i^2 I}{2} \right) \exp(-\alpha_i I^{1/2}) \right] + \left(\frac{2\beta^1}{\alpha_i^2 I} \right) \left[1 - \left(1 + \alpha_i I^{1/2} - \frac{\alpha_i^2 I}{2} \right) \exp(-\alpha_i I^{1/2}) \right]$$

$$C_{ca}^r = \frac{3C_{ca}^{\phi}}{2}$$

Para el coeficiente osmótico:

$$\phi - 1 = \left(\frac{2}{\sum_i m_i} \right) \left[\frac{-A_{\phi} I^{1/2}}{(1 + 1.2\sqrt{I})} \right] + \sum_c \sum_a m_i m_a (B_{ca} + ZC_{ca}^{\phi})$$

Las ecuaciones además contienen los siguientes términos:

$$Z = \sum_i m_i |z_i|$$

$$B_{ca} = \beta_{ca}^0 + \beta_{ca}^1 g(\alpha_{ca} \sqrt{I})$$

$$B'_{ca} = \frac{\beta_{ca}^1 g(\alpha_{ca} \sqrt{I})}{I}$$

El número de carga del ion es z_i y el número estequiométrico total es:

$$\nu = \nu_+ + \nu_-$$

Los valores empíricos calculados son para $b = 1.2$ y para $a=2.0$. La función $g(x)$ se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$g(x) = \frac{2[1 - (1+x)\exp(-x)]}{x^2}$$

$$g'(x) = \exp(-x) - g(x)$$

Energía libre de Gibbs

La función de energía libre de Gibbs ΔG , es una medida real de las fuerzas que gobiernan las reacciones químicas (Back y Hanshaw, 1970). La energía libre de reacción, ΔG_R^0 , es la suma de las energías libres de formación de los productos menos la suma de las energías libres de formación de los reactantes; esto es:

$$\Delta G_R^0 = \sum \Delta G_{Rf}^0 \text{ productos} - \Delta G_{Rf}^0 \text{ reactantes}$$

Cuando $\Delta G_R^0 = 0$, no hay trabajo químico y el sistema está en equilibrio. Si ΔG_R^0 es negativo, el proceso procede de manera espontánea y, cuando es positivo, debe introducirse una energía para que las reacciones tengan lugar. De este modo, la constante de equilibrio puede calcularse a partir de la energía libre de reacción de Gibbs de acuerdo con la relación:

$$\Delta G_R^0 = -RT \ln K_{eq}$$

Donde R, es la constante de los gases y T, la temperatura en grados Kelvin

Los valores de energía libre se toman en referencia a la de una sustancia pura a 25°C y una atmósfera de presión. Las aguas naturales y de proceso están a una temperatura diferente, por lo que es necesario extrapolar los datos de energía libre a la de la temperatura real del agua, para lo que se aplica la ecuación de Gibbs-Helmholtz, que establece que, a temperatura constante,

$$\Delta G = \Delta H + T \left(\frac{\delta(\Delta G)}{\delta T} \right)_p$$

Donde, H es la entalpía o calor de reacción. Combinando las dos últimas ecuaciones se obtiene la Ecuación de Van't Hoff:

$$\left(\frac{\delta(\Delta G)}{\delta T} \right)_p = \frac{\Delta H}{RT^2}$$

Cuando la temperatura T oscila poco alrededor de 25°C, esta ecuación es una aproximación justa, pero para grandes variaciones deja de ser válida asumir que ΔH es **independiente** de la temperatura.

Coefficiente de actividad

En soluciones diluidas, la molalidad es cercana a la actividad, pero para soluciones más concentradas se aplica un factor de corrección que conecta la actividad a_i y la molalidad m_i de las especies iónicas involucradas que equivale a:

$$\gamma_i = \frac{a_i}{m_i}$$

$$O, a_i = m_i \gamma_i$$

Donde, γ_i , es el coeficiente de actividad de la componente i que puede calcularse a partir de la ecuación de Debye-Hückel; a saber:

$$\log \gamma_i = -Az_i^2 \frac{\sqrt{I}}{1 + Ba_i \sqrt{I}}$$

Donde A y B son coeficientes que dependen de la temperatura, z_i , la carga del ion; a_i , el radio iónico de la especie considerada (Tabla 1).

$$A = 0.4883 + 8.074 \times 10^{-4} T$$

$$B = 0.3241 + 1.6 \times 10^{-4} T$$

En aguas cársicas naturales la fuerza iónica se mantiene bajo 0,1 y la extensión de Debye-Hückel se puede aplicar con confianza. Nótese que γ_i tiende a 1 cuando I se aproxima a 0.

Tabla 1. Coeficientes de actividad γ_i , para algunos iones comunes en sistemas cársicos referidos para T=15°C calculados por la ecuación de Debye-Hückel extendida (Dreybrodt, 1988). Valores intermedios pueden obtenerse mediante interpolación lineal en la Fig. 5

Ion	Fuerza iónica (I)					Radio iónico
	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1	
H	0,967	0,935	0,915	0,856	0,828	9
Mg	0,874	0,76	0,694	0,522	0,45	8
Ca	0,872	0,751	0,68	0,489	0,407	6
CO ₃	0,87	0,745	0,669	0,461	0,37	4,5
SO ₄	0,87	0,743	0,667	0,456	0,363	4
HCO ₃	0,965	0,929	0,904	0,822	0,776	4
Na	0,965	0,929	0,904	0,822	0,776	4
OH	0,965	0,927	0,902	0,815	0,765	4
Cl	0,965	0,927	0,902	0,815	0,765	4

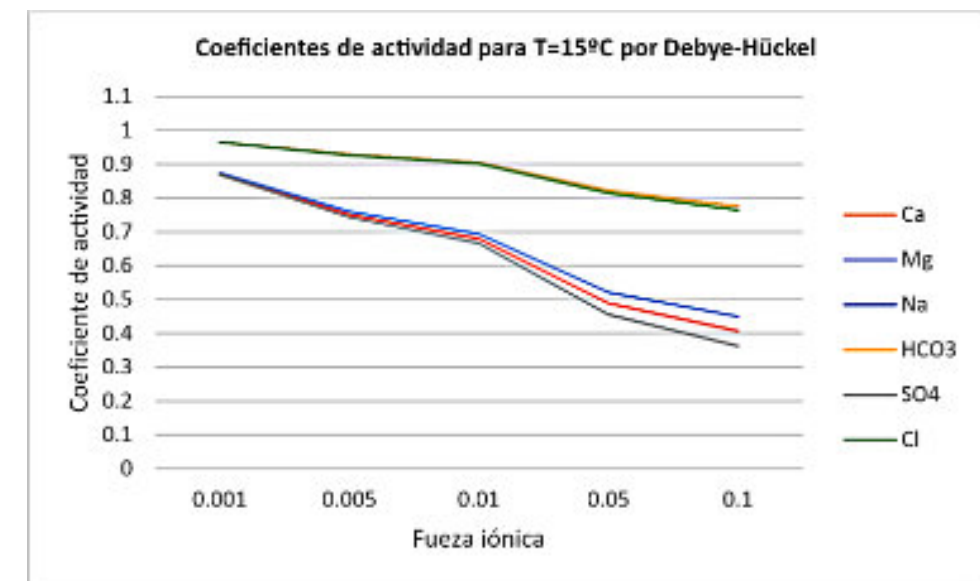


Fig. 5. Gráfico de base para la interpolación lineal de los coeficientes de actividad para T=15°C calculados por la ecuación de Debye-Hückel extendida.

Las Figs. 6-8 muestran la distribución, en el plano cartesiano, de las relaciones entre la fuerza iónica I y el log de la Actividad iónica de las aguas muestreadas en el yacimiento de prueba. No hay grandes diferencias en las relaciones entre I a 25 y 60°C en el modelo, como puede notarse en la Fig. 7.

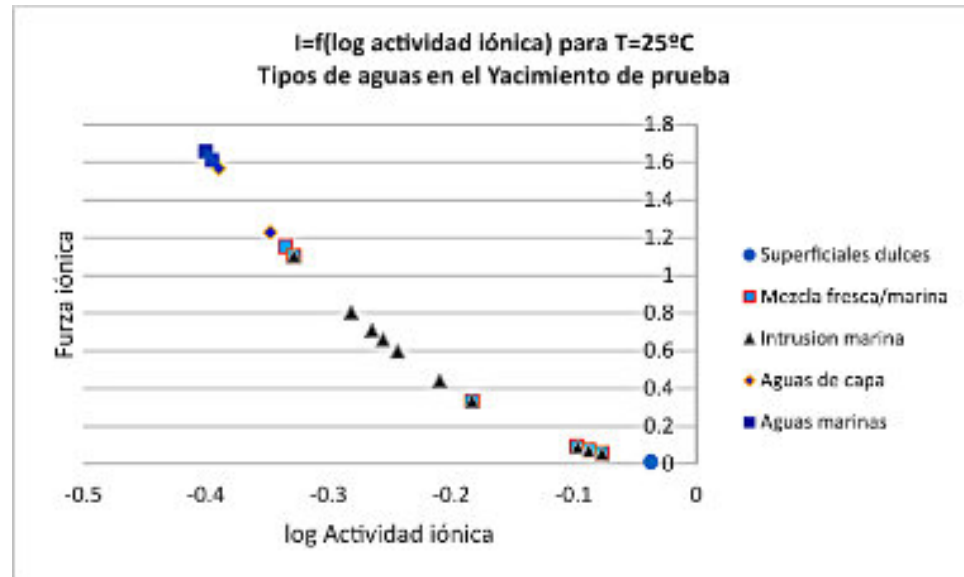


Fig. 6. Distribución de la relación $I=f(\log \gamma_i)$ en las aguas terrestres y marinas del Yacimiento í para $T=25^\circ\text{C}$. Obsérvese la compatibilidad entre las aguas de capa y marinas y la subordinación geoquímica, en el mismo plano, con las aguas terrestres subterráneas salobres, subterráneas salinizadas y las superficiales dulces.

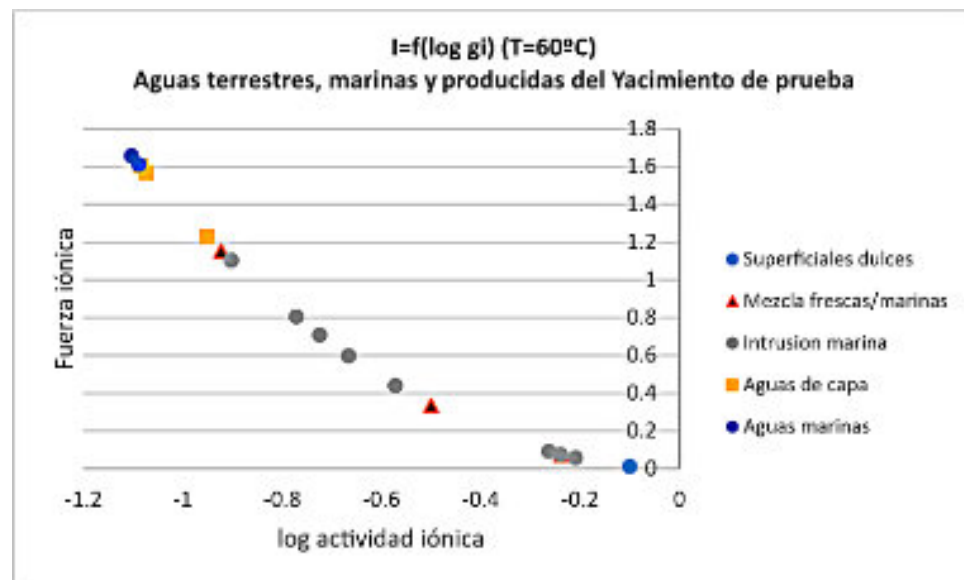


Fig. 7. Distribución de la relación $I=f(\log \gamma_i)$ en las aguas terrestres y marinas para $T=60^\circ\text{C}$. Obsérvese que la compatibilidad entre las aguas producidas y las marinas se ajusta mejor a la tendencia y se mantiene idéntica subordinación geoquímica, en el mismo plano, de las aguas terrestres subterráneas salobres, subterráneas salinizadas y las superficiales dulces.

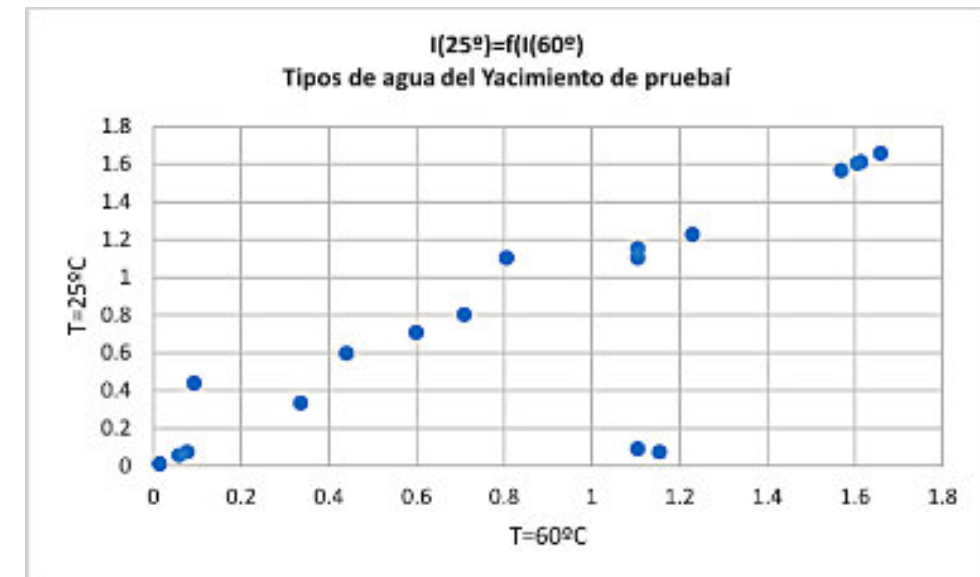


Fig. 8. Distribución de las relaciones entre las fuerzas iónicas de las soluciones naturales muestreadas en el Yacimiento de prueba.

Para los tipos de agua en el yacimiento de prueba, la relación entre la mineralización total de las aguas (en mg/L) y la actividad iónica muestra una correlación lineal del 74% para el 95% de certidumbre y se presenta en la Fig. 9.

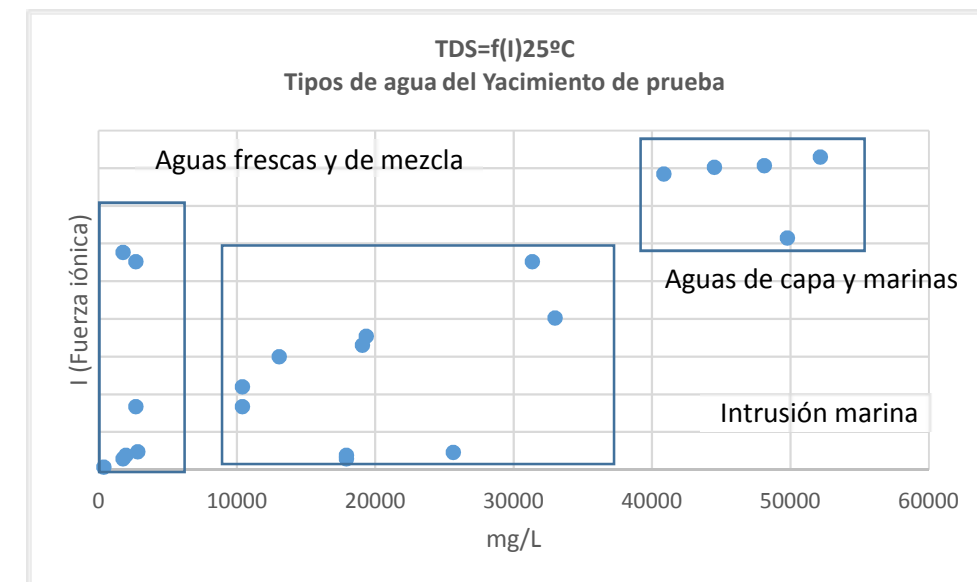


Fig. 9. Relación entre la mineralización total de las aguas en el yacimiento de prueba y la fuerza iónica de las soluciones.

Tasa de producción de entropía

En Cuba, estos procesos han sido estudiados por Arellano, Molerio y Santos (1993) y por Molerio (1994) sobre la base de los principios de la termodinámica de no equilibrio aplicadas a sistemas acuíferos, respectivamente en rocas metamórficas y en sistemas cárnicos (Back y Hanshaw, 1971; Carnahan, 1976; March y Molerio, 1987; Molerio, 2013a, 2013b). El cálculo se aplica en tanto se hace necesario identificar el momento en que se alcanza el equilibrio estequiométrico en el sistema (Plummer, 1977; Plummer y Back, 1980) considerando los tiempos de tránsito del fluido multifásico de densidad variable y la resolución de los problemas más complejos relacionados con la interacción agua-roca y la organización del flujo multifásico gobernado por la diferencia de densidad de las fases líquidas, como son:

1. La capacidad de asimilación de las aguas producidas y de la mezcla.
2. Reactabilidad y efecto de mezcla en acuíferos cársicos
3. Definición de la longitud de mezcla
4. Transporte de calor

La producción de entropía resulta un concepto unificador que relaciona los cambios en las energías físicas y químicas y provee una variable de integración en puntos específicos de un mismo sistema acuífero o entre dos sistemas relacionados. De aquí se avanza a la caracterización del sistema combinando las ecuaciones de balance de masas, momento y energía con la ecuación de Gibbs para lograr una formulación adecuada que exprese el balance de entropía, En todo caso, se supone la simetría del campo tensorial de los coeficientes fenomenológicos involucrados.

Se define la entropía a partir de la segunda ley de la termodinámica en que $ds \geq \frac{DQ}{T}$ siendo dS el cambio infinitesimal de entropía para la parte infinitesimal de un proceso reversible, donde DQ es el calor absorbido y T, la temperatura absoluta a la que es absorbido el calor. La entropía es una función matemática para el término DQ/T que es un diferencial exacto en el cual DQ no puede ser integrado sin especificar el recorrido. En otros términos, ello significa que DQ/T es tanto una variable extensiva como una función termodinámica. La entropía es una variable de estado que se define por su variación en el tiempo y no por un valor absoluto.

En este caso, la variación de entropía se refiere a la degradación de la energía utilizable de un sistema y es, entonces, una indicación de la degradación o del agotamiento de un sistema. La combinación de todas las reacciones espontáneas en un sistema natural tiende a incrementar la entropía de ese sistema, lo que constituye la base para establecer que la entropía del universo se mueve hacia un máximo.

La energía y la entropía se expresan en unidades semejantes; calorías por mol para a primera y calorías por mol por grados, para la entropía. Esta, a diferencia de la energía, debe conceptualizarse como un índice de la capacidad para el cambio espontáneo y es, por tanto, un indicador que resume de manera concisa todas las formas en que las variables de temperatura, presión y composición pueden cambiar en un sistema natural (Back y Hanshaw, 1971; Engelen y Jones, 1986; Molerio, 2013a; 2021a, 2021b). La aproximación conceptual del modelo que se aplica requiere a aplicación combinada de los principios de la termodinámica de no equilibrio o de los procesos irreversibles (Fitts, 1962; Carnahan, 1976; Shenk y Franklin, 2001; March y Molerio, 1987; Molerio, 1985; Nieto-Villa et al., 2013) en sistemas naturales (Anderson, 2005), pero sobre todo Onsager (1931a, 1931b), Prigogine (1955, 1967), Kondepudi y Prigogine (1999).

Para evaluar el sistema natural, la tasa de producción de entropía se combina con la tasa de flujo y de las reacciones químicas. De ahí se derivan conclusiones importantes para la precisión del tiempo de tránsito de las aguas naturales que, mezcladas con el agua producida, produce un fluido multifásico de densidad variable (MAP) que circula por el sistema acuífero.

El movimiento del agua subterránea se efectúa por diferencia de potencial de carga, que se define como la suma de la energía potencial gravitacional y la energía de presión. En virtud de la baja velocidad de las aguas, la energía cinética del flujo se desprecia. De esta manera, en un sistema arbitrario, con presión de 1 atm, elevación cero y velocidad cero, el potencial Φ en cualquier punto del acuífero se define como:

$$\Phi = gz + \frac{P}{\rho}$$

Donde g, es la aceleración de la gravedad; z, es la elevación sobre un plano de referencia; P, la presión y ρ , la densidad. El término carga total se relaciona con el potencial a partir de la expresión $\Phi = gh$, donde h, es la carga hidráulica; v.gr., la altura del agua sobre el plano de referencia, generalmente el nivel del mar.

De este modo, la carga hidráulica es también una variable de estado independiente de los procesos que producen el cambio en la carga. El cálculo de la pérdida de energía debida al movimiento del fluido, se reemplaza el proceso irreversible desconocido por un proceso reversible conocido y la pérdida de carga representa la pérdida de energía útil del sistema, lo que equivale a medir el cambio de entropía en el mismo. La energía potencial del sistema de flujo no puede transformarse en energía cinética, por lo que toda la energía cinética se transforma en calor absorbido por el sistema, lo que significa que los cambios de entropía debidos a la pérdida de calor pueden tratarse como procesos reversibles y calcularse mediante los cambios en la energía potencial asociada al flujo en el sistema. Así, los cambios en la altura piezométrica permiten determinar la mínima producción de entropía. La diferencia de la producción de entropía adicional con la mínima permite obtener la producción de entropía debida a procesos físicos, separando las fuentes de calor en el sistema (flujo calórico de la tierra, radiación solar, calores de disolución y precipitación y producción de calor de fricción).

De acuerdo con la composición química de las rocas del acuífero en el Polígono de Inyección, donde domina la calcita y, en menor grado, la dolomita, solamente es necesario considerar dos reacciones químicas para describir los cambios químicos fundamentales en el sistema. En primer lugar, la disolución de la calcita por agua y CO₂ y, en segundo lugar, la disolución de la dolomita por los mismos mecanismos. El proceso de dolomitización/dedolomitización por agua marina será considerado más adelante.

La Tabla 2 resume los valores estandarizados de entropía de algunas sustancias.

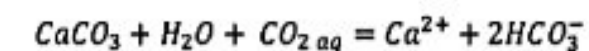
Tabla 2. Valores estandarizados de entropía S° (según Back y Hanshaw, 1971).

Sustancia	S° (cal/°K/mol)
Ca ²⁺ aq	-13,2
Mg ²⁺ aq	-28,2
HCO ₃	22,7
CO ₂ aq	29,0
H ₂ O	16,716
SO ₄ ²⁻	4,1
CaCO ₃ calcita	22,2
CaMg(CO ₃) ₂ dolomita	37,09

Producción de entropía química

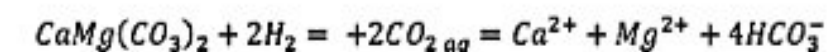
La producción de entropía química ($\Delta S_{i,R}$) en el sistema siendo; i, lugar en el acuífero, R, reacción que corresponda, viene dada por la entropía de las reacciones químicas mencionadas, como se muestra a continuación.

Para la calcita,



$$\Delta S_{reacción} = -35,7 \text{ cal/}^\circ K/mol$$

Para la dolomita,



$$\Delta S_{reacción} = -79,9 \text{ cal/}^\circ K/mol$$

Para cualquier punto i, en el sistema acuífero, el cambio de entropía viene dado por las siguientes relaciones:

$$\Delta S_{i,calcita} = \Delta S_{R,calcita} [m_{Ca} + (m_{Mg} + m_{SO_4})]$$

$$\Delta S_{i,dolomita} = \Delta S_{R,dolomita} * m_{Mg}$$

$$\Delta S_{quim} = \Delta S_{calcita} + \Delta S_{dolomita}$$

Donde ΔS , es el cambio de entropía; m, la molalidad, i, la designación de cualquier sitio, R, subíndice para las reacciones relativas a la calcita y la dolomita. En el caso de $\Delta S_{i,calcita}$ el signo $\pm$ se incluye para significar, cuando +, la presencia de otra fuente de aporte de Mg en la reacción. Estas eventuales fuentes, como se mencionó, serán discutidas más adelante.

La Tabla 3 muestra la variación de entropía química en el Polígono de Inyección.

Tabla 3. Cambios de entropía química (ΔS_{quim}) en el sistema de flujo del Polígono de Inyección (en cal/°K/mol)

Estación	Calcita	Dolomita	ΔS_{quim}
1C	5,40	-6,72	-1,32
1C-07	1,86	-3,10	-1,25
1C-05	0,60	-0,77	-0,17
1C2007	7,93	-10,40	-2,47
21A	0,62	-0,81	-0,19
22A	3,86	-4,78	-0,92

Para un ciclo casi completo interanual, los cambios de entropía química en la estación 1C del Polígono de Inyección propuesto se muestran en la Fig. 10.

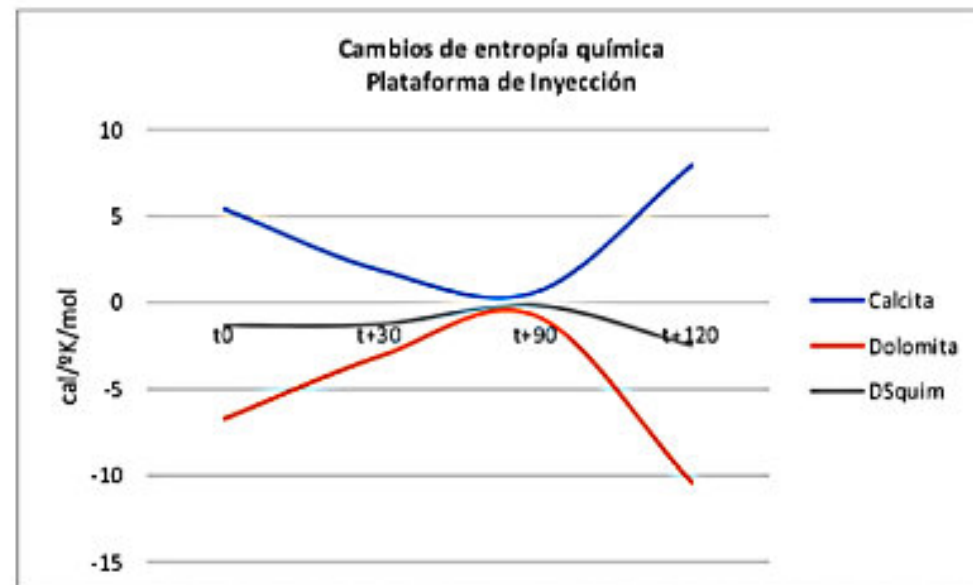


Fig. 10. Cambios en la entropía química de las aguas subterráneas en el sistema de flujo de la plataforma de inyección

La **variación total de entropía** que resulta de las reacciones químicas, partiendo de la base de que la cantidad de entropía producida por mol de sustancia disuelta guarda una relación lineal para las concentraciones en un rango que va desde la dilución infinita hasta la saturación en las dos fases descritas, es la siguiente:

$$\Delta S_{reacciones} = \Delta S_{reactantes} - \Delta S_{productos}$$

Producción de entropía mecánica

Entonces, siguiendo a Back y Hanshaw (1971), el **cambio de entropía (ΔS_{mec}) mecánica**, debida al movimiento del fluido, en mcal/kg/°K, se expresa como:

$$\Delta S_{mec} = (h_{m\acute{a}x} - h_i) \frac{2,34 * 10^{-3} mcal}{^{\circ}K}$$

La Tabla 4 resume los valores de ΔS_{mec} calculados en el polígono de inyección (Fig. 11) para un ciclo de 13 meses) en un sistema cuyo balance de masas resulta estable.

Tabla 4. Cambios de entropía mecánica (ΔS_{mec}) en el sistema de flujo del Polígono de Inyección.

Mes	Dic	Ene	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
NE	3,87	3,87	4,34	4,33	3,88	3,6	3,95	3,97	3,94	3,92	3,89	4	4,2
CP	0,281	0,281	-0,189	-0,179	0,271	0,551	0,201	0,181	0,211	0,231	0,261	0,151	-0,049
□S	2,1 E-06	2,1 E-06	5,8 E-06	5,7 E-06	2,2 E-06	2,6 E-21	2,7 E-06	2,9 E-06	2,7 E-06	2,5 E-06	2,3 E-06	3,1 E-06	4,7 E-06



Fig. 11. Distribución interanual de ΔS en la cala 1C del borde oriental del Polígono de Inyección (para $T=25^{\circ}C$).

La **variación total de entropía ΔS** en el sistema es la suma de ambas entropías, la química y la mecánica.

Transferencia de calor

Las aguas de capa que se pretende disponer con esta tecnología se extraen del yacimiento con una temperatura relativamente alta.

En los casos estudiados en Cuba, esa temperatura es de alrededor de $81^{\circ}C$ y, durante el proceso de tratamiento se rebajan hasta alrededor de $31,5^{\circ}C$ como promedio, pero en no pocos casos, la temperatura de inyección puede ser el doble de ésta. Con tales temperaturas son inyectadas en capas ya no productivas del yacimiento a profundidades entre 2000 y 3000 metros. En el estudio que se conduce, cuyos principios básicos han sido enunciados en artículos anteriores (Molerio, 2015, 2017, 2020a, 2020b) se evalúa la posibilidad de reducir al mínimo la presión de inyección y, preferiblemente, evitarla disponiendo las aguas de capa tratadas en un acuífero somero libre a semilibre carsificado y salinizado por intrusión marina que yace entre 20 y 40 m de profundidad. En los cálculos se redujo a $60^{\circ}C$.

La modelación de los procesos de intercambio de temperatura se ha basado en los enunciados clásicos de Stallman (1960, 1965) y Cartwright (1968, 1974).

De acuerdo con estos autores, la transferencia simultánea de calor y fluido (Modelo de Stallman-Cartwright) puede expresarse del modo siguiente (Fig. 12):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{c_w \rho_w}{k} \left(\frac{\partial v_x T}{\partial x} + \frac{\partial v_y T}{\partial y} + \frac{\partial v_z T}{\partial z} \right) = \frac{c \rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde,

T, es la temperatura en cualquier punto en el tiempo t

x, y, z coordenadas cartesianas de referencia

v, velocidad del flujo en la dirección indicada por los subíndices x,y,z

c_w, calor específico del agua

c, calor específico del complejo roca-fluido

ρ, densidad del complejo roca-fluido

ρ_w, densidad del agua

k, conductividad térmica del complejo roca-fluido

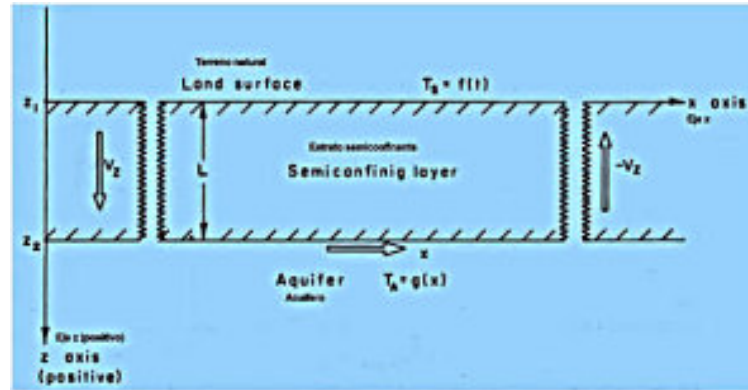


Fig. 12. Modelo conceptual del sistema de flujo (según Cartwright, 1974).

El fluido y el flujo conductivo de calor ocurren verticalmente paralelos al eje z en régimen permanente y flujo uniforme y bajo la condición adicional de que la temperatura del fluido y la roca son las mismas todo el tiempo en todo el sistema. Condición de borde adicional es que las propiedades térmicas son constantes en tiempo y espacio para flujo unidimensional vertical de calor y fluido la ecuación anterior se simplifica a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \left(\frac{c_w \rho_w v_z}{k} \right) \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde ahora,

α es la difusividad térmica que equivale a $\frac{c \rho}{k}$

t, tiempo desde el inicio del flujo

P, período de la fluctuación de temperatura del aire

La oscilación anual de calor se describe por una onda sinusoidal de temperatura:

$$T_s = f(t) = T_m + Tr \sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right) \text{ para el caso } z = 0$$

La temperatura en el infinito se asume que está afectada por la temperatura ambiente en superficie que, en el límite, es igual a la temperatura ambiente media y por la del fluido, que en el límite es igual a la temperatura media del agua inyectada; es decir,

$$\lim_{z \rightarrow \infty} T_z = T_m$$

La solución general del modelo es:

$$T_z = T_s \exp\left[-z \left(\sqrt{E^2 + \frac{F^4}{4}} + \frac{F^2}{2} \right) - F\right] \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right) - \left(z \sqrt{E^2 + \frac{F^4}{4}} + \frac{F^2}{2} \right) \right]$$

En la que,

$$E = \frac{\pi}{\alpha_0} P$$

$$F = \frac{c_w \rho_w v_z}{2k_0}$$

Esta ecuación, debida a Cartwright (1974), describe el flujo simultáneo de calor y fluido en un medio poroso uniforme y puede aplicarse en la descripción del flujo de calor entre la superficie y un acuífero somero considerando que el efecto de la onda sinusoidal de temperatura del aire es despreciable en la interface entre la capa confinante y el acuífero y que la temperatura del acuífero es constante.

El efecto de flujo horizontal sobre la temperatura del suelo puede encontrarse determinando la temperatura del acuífero y asumiéndola constante en cualquier punto añadiéndole los efectos de conducción del calentamiento/enfriamientos periódicos de la superficie al flujo permanente de calor entre el acuífero y la superficie. Para flujo de calor permanente en la zona no saturada (que se hace 0 en condiciones de semiconfinamiento o aislamiento del sistema aplicando propagación δ de Dirac), la solución es (Molerio 1992c, 1992d; Molerio, Guerra y Leal, 2013):

$$T_{zs} = -\frac{z_1 T_A - z_2 T_m}{L} + \frac{(T_A - T_m)z}{L}$$

En la que,

T_{zs}, es la temperatura resultante de los efectos del acuífero

T_A, la temperatura a la profundidad z₂ (la interface acuífero-capa confinante)

T_m es la temperatura media del suelo

L, espesor de la capa confinante

Para cualquier profundidad (puesto que T no es función del tiempo) la solución simultánea es:

$$T_{zs} = T_s \exp\left[-z(E)^{1/2}\right] \sin\left[\left(\frac{2\pi t}{P}\right) - z(E)^{1/2}\right] - \frac{z_1 T_A - z_2 T_m}{L} + \frac{(T_A - T_m)z}{L}$$

En la que,

$$L = z_2 - z_1$$

La distribución de T a lo largo de una la distancia x en la línea superior de flujo (tope del acuífero) es:

$$T_A = g(x) = T_{Acuandoz=0} + \frac{k_A x}{c_w \rho_w v_x} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

El decrecimiento de la onda de temperatura con la profundidad en un semi espacio semi-infinito puede expresarse entonces como:

$$T = T_0 \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi}{p\alpha}}\right)$$

Donde,

T, amplitud de la onda a la profundidad x (°C)

T₀, la amplitud de la onda en superficie (°C)

X, profundidad (cm)

P, periodo de la onda (segs)

α, difusividad térmica (cm²)

El calor añadido a una columna de roca se define como:

$$H_w = (T_r - T_g) + (T_{capa} - T_{ac}) C_w h_w$$

Donde,

H_w, calor añadido

T_r-T_g, la temperatura media del agua de lluvia menos la temperatura media de los primeros 200 cm de suelo

C_w, la capacidad calorífica del agua

H_w, la columna de agua que ingresa en el suelo

El cambio de temperatura que resulta de la adición de calor a una columna de suelo de espesor L es igual al calor añadido dividido por la capacidad calorífica total de la columna de suelo; es decir:

$$\Delta T = \frac{H_w}{L} (C_s \rho_s + C_w \rho_w a)$$

Los valores de entrada y salida del modelo se resumen en la Tabla 5. La Fig. 13 muestra los resultados de la simulación.

Tabla 5. Variables y valores de entrada/salida del modelo de transporte de calor en el caso de estudio

Variables	Entrada	Salida
Espesor de la columna de suelo	200 cm	
Temperatura del agua de capa	60°C	
Temperatura del agua del acuífero	24°C	
Temperatura del agua de capa tratada en el punto de inyección	31,5°C	
Diferencia de temperatura (agua de lluvia-suelo)	2°C	
Densidad del suelo	1,78 g/cm ³	
Densidad del agua	1 g/cm ³	
Calor añadido		1900 cal/cm ²
Cambio de temperatura por calor añadido		7,5°C
Distancia desde la fuente a la que se disipa totalmente el calor añadido		12 m

La aceptabilidad ambiental del acuífero cársico salinizado de aguas de alta temperatura es uno de los elementos básicos para fundamentar el proyecto de inyección somera de aguas de capa tratadas (Molerio, 2015). Los resultados obtenidos, aunque susceptibles de ser refinados aún más, son suficientemente rigurosos y satisfactorios para justificar el proyecto. La forma en que ello afecta la movilidad de los componentes (macro, y microelementos) no afecta sustancialmente el cuadro ambiental general. Pero desde el punto de vista teórico, se trabaja en la modelación de la zona de influencia cercana; es decir, en los 12 metros alrededor del punto de inyección.

Una limitación de este estudio y, en general, de investigaciones similares, como ha señalado Covington et al. (2011), es el hecho de que los modelos propuestos para calcular el intercambio de calor entre el agua subterránea y los conductos cársicos descansan en presunciones que no han sido examinadas en detalle tanto desde la perspectiva teórica como desde las observaciones de campo.

En particular, el tema de la convección resulta de especial significación, toda vez que la mayor parte de los modelos asumen que la transferencia de calor entre el agua (o el aire) y los conductos son controladas por transporte convectivo. Asumiendo una temperatura constante de la roca en las paredes del conducto. Esto último, sin embargo, es consistente con resultados obtenidos por el autor y tiene una importancia destacada en el control de los procesos de evaporación/condensación en los conductos cársicos (Molerio, 1992a, 1992b; Molerio, Fariñas, Azcue, 1990; Molerio, Guerra y Leal, 2013).

Especialmente importante es definir el efecto de la conducción, convección, evaporación, condensación en los conductos cársicos, la tasa de flujo y la radiación en los aportes y los flujos superficiales y subterráneos y la mezcla entre ambos. El papel de conductos saturados completamente no se conoce y es tema de investigación.



Fig. 13. Disipación de la onda de temperatura del agua con la profundidad. La línea vertical marca la distancia desde el origen en que se anula totalmente el cambio de temperatura.

COMPATIBILIDAD GEOQUÍMICA CON LAS AGUAS TERRESTRES Y MARINAS

Los procesos de intercambio iónico son un tipo de procesos superficiales en los que se combinan fenómenos simultáneos de adsorción y desorción. Estos procesos suponen el desplazamiento de un ion “asociado” a una superficie sólida por otro presente en la solución acuosa y, por ello, pueden ser considerados como una expresión más de los mecanismos competitivos (por un limitado número de sedes de adsorción) que intervienen en los procesos de superficie.

Normalmente se considera que este tipo de procesos de intercambio afectan a los iones adsorbidos como complejos de esfera externa en la capa de Helmholtz o de Stern¹ o a los situados en la capa difusa asociada a las superficies cargadas y puede producirse entre aniones (intercambio aniónico) o entre cationes (intercambio catiónico). Los procesos de intercambio iónico son rápidos, reversibles y estequiométricos. Dentro del conjunto de procesos geoquímicos de baja temperatura representan uno de los tipos de reacciones con una velocidad más elevada y, por ello, su cinética se encuentra controlada por los mecanismos de transporte de los iones. Este tipo de procesos se denominan estequiométricos ya que, como consecuencia del requerimiento de electroneutralidad, los iones que abandonen la superficie tienen que ser reemplazados por una cantidad equivalente (en términos de carga eléctrica) de otros iones.

Flujo de densidad y temperatura variable: descarga de aguas producidas en cuerpo receptor salino terrestre o ecotono tierra-océano

Los procesos de intercambio iónico pueden ser tanto procesos de intercambio catiónico como procesos de intercambio aniónico. El que sea de un tipo u otro dependerá de la carga de la superficie sólida en contacto con la solución acuosa. La compatibilidad geoquímica se muestra en las Figs. 14-15. Los resultados más importantes son:

- Las aguas que integran el sistema multicomponente tienen una composición en macroconstituyentes semejante.
- La data correspondiente a las aguas de capa no muestra la existencia de verdaderas salmueras de petróleo. Por el contrario, como puede verse en las figuras correspondientes, todos los casos evaluados muestran aguas con mineralización igual o menor a las del mar en la zona de trabajo y de composición semejante a las aguas subterráneas lo que parece deberse a:
 - Son aguas de horizontes carbonatados carsificados y/o con notable porosidad secundaria.
 - Los tiempos de renovación son variables, pero más bien bajos.
 - Las aguas de los yacimientos no parecen haber sido sometidos a procesos intensos de evaporación y concentración geoquímica.

La fuente principal de aporte de las aguas subterráneas en Cuba son las lluvias y, por tratarse de un territorio insular, el elemento traza distintivo es la concentración de Cloruros (Cl). La concentración base de Cloruros en el agua de lluvias se determina:

- Mediante mediciones directas.
- Aplicando la Ecuación de Schoeller-Molerio (en mg/L) de nivel de fondo de Cl en el agua de lluvia en función de la distancia a la costa x (en km):

$$Cl = 16 \exp(-0,0462x) + 5 \exp(-0,0015x)$$

Todas las aguas subterráneas en acuíferos carbonatados muestran patrones geoquímicos semejantes y las diferencias básicas se deben a: a) la distancia a la costa y b) el tiempo de residencia de las aguas (tiempo de contacto agua-roca) lo que incluye el potencial de velocidad y el grado de saturación con respecto a los iones básicos (Ca, Mg, Na).

Las relaciones de saturación a la calcita (RSC) y a la dolomita (RSD) fueron calculadas para el universo de muestreo a partir de la expresión del Índice de Saturación (SI):

$$SI = \log \frac{\{HCO_3\} \{Ca, Mg\}}{P}$$

¹ La **doble capa eléctrica** describe la variación del potencial eléctrico próximo a una superficie. La doble capa es un término que describe el arreglo que presentan los iones y las moléculas de solvente en solución al aproximarse a la superficie de un electrodo cargado eléctricamente, de tal forma que se presentan dos capas con polaridad distinta separadas por una distancia de orden molecular. Adquiere gran importancia en el comportamiento de los coloides y otras superficies en contacto con solventes. Uno de los principales efectos de la existencia de la doble capa en la interfaz electrodo-solución es la acumulación de carga o capacitancia, superpuesta a una actividad farádica.

Donde, <> son las actividades de los iones considerados y P el producto de solubilidad. Todas las aguas terrestres están insaturadas respecto a la calcita, excepto las aguas marinas, todas ligeramente saturadas y, en menor grado, sobresaturadas. Respecto a las dolomitas, todas las aguas (marinas y producidas/de capa) están en la línea de saturación (Tabla 6).

Todas las aguas terrestres de Cuba se encuentran en los límites establecidos en los Miembros Geoquímicos Terminales descritos por Molerio (1992a, 2012). Las aguas de diferentes fuentes/horizontes acuíferos pueden mezclarse si exhiben compatibilidad geoquímica, que es una función de las fuentes y la distribución y la concentración de los macro constituyentes (HCO₃, SO₄, Cl, Ca, Mg, Na, K).

Las aguas producidas de los yacimientos gasopetrolíferos carbonatados muestran patrones semejantes a los de las aguas subterráneas salinizadas de los acuíferos cársicos litorales someros. Las diferencias fundamentales en microelementos seleccionados se deben al diferente grado de saturación y migración acuosa. La saturación diferencial se resuelve mediante el Modelo de Pitzer de manera mucho más precisa que con el modelo clásico de Debye–Huckel.

Tabla 6. *Relación de saturación a la calcita (RSC) y a la dolomita (RSD) en las aguas muestreadas.*

Muestra/estación	RSC	RSD
Agua de Mar	2,669	1,89E+01
Aguas de mezcla	3,433	1,53E+01
Aguas de Capa	4,822	2,13E+01
Media aguas de capa	0,608	1,45E+01
Agua Producida (CEINPET)	0,432	1,42E+01
Agua Producida (SICOG)	-0,045	1,43E+01
Agua Producida (GAMMA)	0,890	1,46E+01
1C	-0,459	1,36E+01
1C-07	-0,214	1,34E+01
1C-05	-0,465	1,29E+01
2C	-0,279	1,39E+01
2C-05	-0,187	1,38E+01
3C	-0,685	1,28E+01
3C-07	-0,710	1,28E+01
1C2007	-0,279	1,39E+01
3C2007	-0,685	1,28E+01
21A	-0,665	1,29E+01
22A	-0,339	1,36E+01
23A	-0,198	1,39E+01
24A	-0,162	1,37E+01
25A	-0,207	1,39E+01
1C2007	-0,214	1,34E+01
3C2007	-0,710	1,28E+01

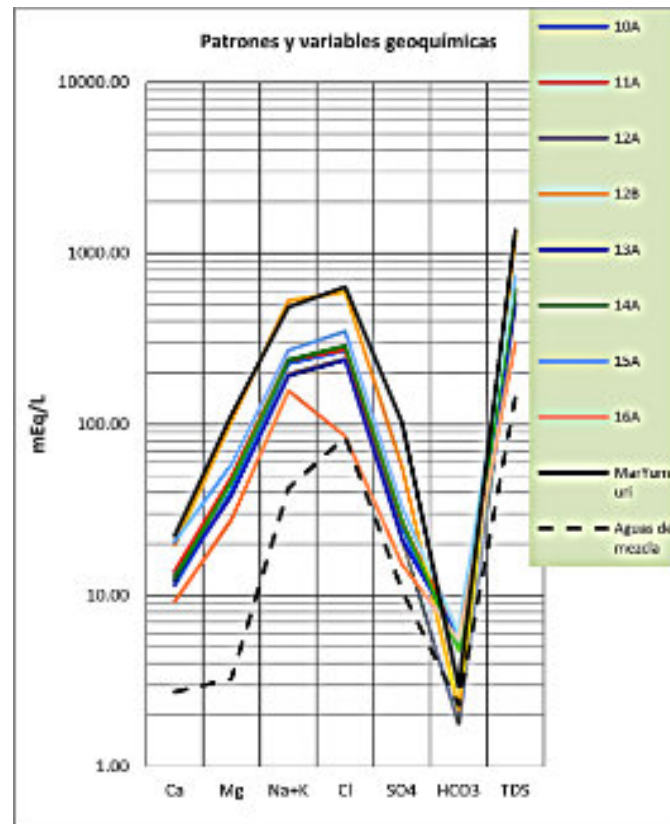


Fig. 14. Patrones geoquímicos y composición en macroconstituyentes de las aguas subterráneas en el área de ensayo a partir de la información de los pozos de observación.

La compatibilidad geoquímica debe definirse entre:

- las aguas producidas a inyectar y los fluidos del horizonte receptor.
- las aguas producidas a inyectar y la litología de las zonas de inyección y los sellos o capas confinantes.
- la capacidad calorífica del agua producida a inyectar y la del acuífero.
- las propiedades agresivas o incrustantes de la mezcla de agua resultante

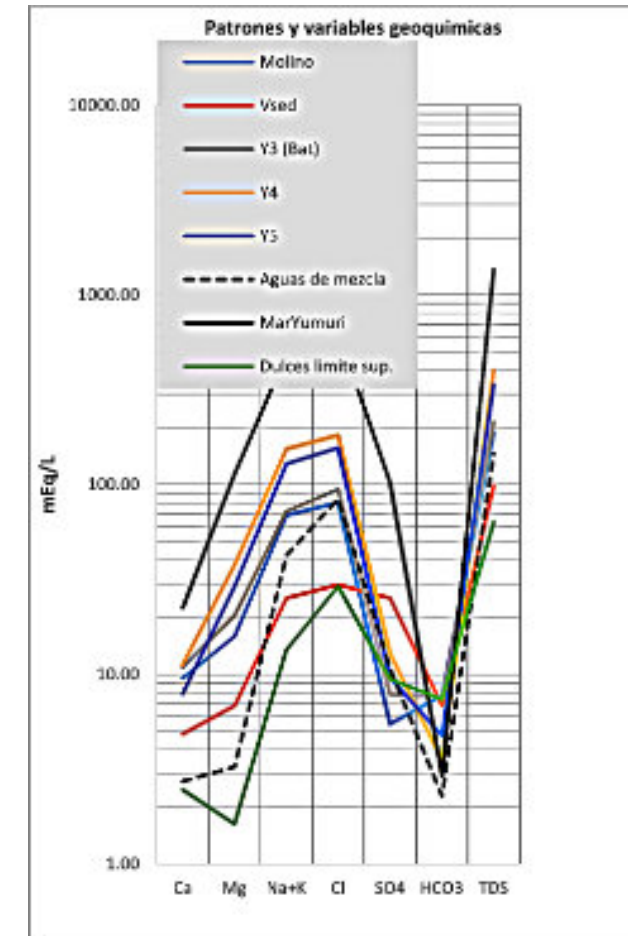


Fig. 15. Patrones geoquímicos y composición en macroconstituyentes de las aguas subterráneas en el área de ensayo.

Flujo de densidad y temperatura variable: descarga de aguas de capa en cuerpo receptor salino marino

Para un cuerpo receptor de agua de mar que recibe una carga de agua producida tratada el comportamiento fue sumamente satisfactorio. Se operó sobre un modelo de simulación de la dilución de muy buena resolución (Frick, et al., 2003; Frick, 2004) y con extraordinarias ventajas para la solución del problema de la migración y distribución de las aguas de capa tratadas en el mar; entre ellas: a) la abierta semejanza en la composición química de ambos sistemas: el receptor y el emisor (Molerio 2020a, 2020b); b) la naturaleza de las especies químicas patrón, consideradas contaminantes índice para comprobar la eficiencia de la dilución y sus radios de protección, así como la distribución espacial de los puntos de monitoreo ambiental y c) la tolerancia del cuerpo receptor para la mezcla resultante. En este caso, el modelo no consideró una interface abrupta, sino que puede producirse, como en efecto se comprobó, una mezcla homogénea al cabo de un tiempo t y distancia L , determinadas.

Los términos básicos del modelo de dilución (Frick, 2004), son los siguientes:

Para la **dilución volumétrica** (S_a):

$$S_a = \frac{v_e + v_a}{v_e}$$

Para la dilución efectiva (S_{eff}):

$$S_{eff} = \frac{c_e}{c_p} = \frac{1}{\frac{1}{S_a} + \frac{c_a}{c_e}}$$

Donde V_e es el volumen inicial del elemento de la pluma (volumen de control) y V_a es el volumen de agua que se incorpora al elemento k en la pluma en el proceso de dilución; c_e es la concentración del elemento k en el efluente, c_p es la concentración del elemento en el punto de interés y c_a la concentración ambiente en el sentido definido por Baumbgarten et al. (1994) y adoptado por Frick (2004) y Frick et al. (2004). En este caso, “si $C_a = 0$, entonces $S_a = S_{eff}$; de otro modo la dilución efectiva es típicamente menor que el volumen de dilución” (Frick, 2004).

La Fig. 16 muestra uno de los resultados de la simulación, provisto por Thomas y Ward (2004) para evaluar la dilución en un cuerpo receptor salino, el mar en este caso (Fig. 17), cuya composición es ambientalmente compatible según la definición de Molerio (2013) para la aplicación de la Teoría de las Interacción Iónica de Pitzer a la disposición final de aguas de capa tratadas.

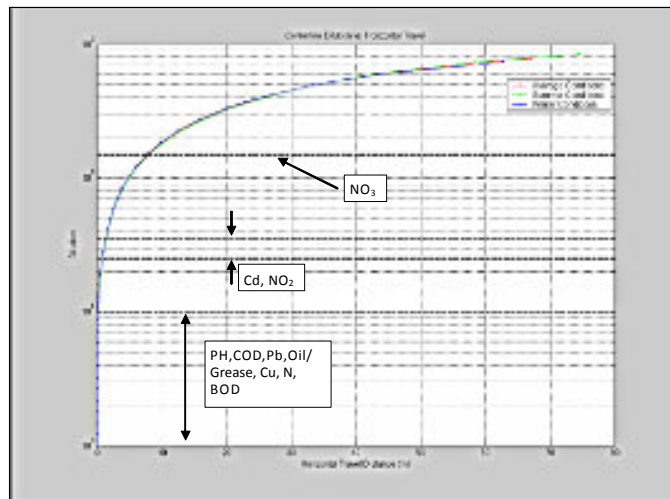


Fig. 16. Dilución de línea central prevista en relación con la distancia del desplazamiento horizontal a partir del punto de vertimiento en verano, en invierno y en condiciones ambientales promedio (tomado de Thomas y Ward, 2004).



Fig. 17. Sector de ensayo de dilución de aguas producidas tratadas en el mar (Foto del autor).

COMPATIBILIDAD GEOQUÍMICA ENTRE LAS AGUAS PRODUCIDAS A INYECTAR Y LA LITOLOGÍA DE LAS ZONAS DE INYECCIÓN Y LOS SELLOS O CAPAS CONFINANTES

El acuífero en la zona de inyección es libre, la inyección es somera, no sobrepasando los 15 metros (y a los fines de diseño, no mayor de ocho metros, que es la profundidad del nivel de las aguas subterráneas, de profundidad bajo la superficie del terreno y las únicas cargas adicionales a la gravitacional a que está sometido es el campo de presiones de la propia variación de carga y el forcing de las mareas, por lo que es innecesario evaluar la compatibilidad de la mezcla con la litología de los sellos o las capas confinantes.

Análisis del campo de presiones en el acuífero

A los efectos de la distribución de los potenciales químicos y de carga en el acuífero libre somero en la zona de inyección, el límite en las condiciones de flujo viene definido por la capacidad de asimilación del sistema a cargas adicionales a las naturales en el sistema receptor.

Camponatural del acuífero: potencial de carga hidráulica

La distribución de los sistemas acuíferos y el modo en que se organiza el flujo subterráneo es de la mayor trascendencia para el proyecto, en tanto la mezcla de fluidos de densidad y temperatura variable forma un sistema multifásico que se mueve a lo largo de las vías principales de drenaje subterráneo.

El cuerpo receptor es un acuífero libre, de flujo difuso, litoral, convergente, con descarga sin presión al mar. El medio de flujo, en rocas carbonatadas, es homogéneo y anisotrópico y las aguas subterráneas en la plataforma de inyección propuesta yacen a unos 7-8 metros bajo la superficie. La evolución del potencial de carga en la Cala 1C fue observada por los autores durante 13 meses continuos y mostró una homogeneidad notable, donde el coeficiente de variación de la fluctuación de la cota piezométrica fue bastante alto, de 1,197, derivado de una oscilación de 0,74 m alrededor de una cota piezométrica promedio de tan solo 0,17 m sobre el nivel del mar, en un rango entre +0,551 y -0,189.

El fuerte control del mar sobre el acuífero se expresa claramente en la composición de las aguas subterráneas. La mineralización dominante en los registros de las Calas de monitoreo 1C y 22A, son de orden de 17000-22000 mg/L, consistentes con el rango de las aguas de mar en el litoral, alrededor de los 25000 mg/L. Estos valores son inferiores a los medidos en las aguas producidas, del orden de los 40000-45000 mg/L, lo que resulta muy ventajoso para el proceso de inyección somera.

Forzamiento de marea

El potencial de carga del sistema acuífero gravitacional está fuertemente influenciado por el movimiento de la marea, pero igual los valores más deprimidos de la posición de nivel de las aguas subterráneas se produjeron en épocas de estiaje, en los meses de febrero, marzo y diciembre. El registro de febrero arrojó el valor mínimo en el registro, de -0,189 m. La mayor carga registrada, en términos de cota piezométrica, ha sido de 0,551 m sobre el nivel del mar. El gradiente hidráulico general al mar es de 0,0044.

La descarga del acuífero tiene lugar bajo el nivel de mar y a cierta distancia de la costa. En el mismo litoral no se han encontrado hasta ahora, manifestaciones de descargas difusas o concentradas, ni tampoco de karsts anquihalinos. No obstante, las exploraciones continúan.

En este caso se ha aplicado el algoritmo del Wu et al. (2018?) quienes demostraron que las estructuras complejas de transporte y dinámica se manifiestan en acuíferos cuyo régimen está forzado por las mareas y que, en ellos, el transporte

de soluto, las reacciones y el comportamiento de la mezcla es muy diferente al que se debería del esquema convencional de flujo Darciano.

Los efectos del forcing de la marea sobre el campo de transmisividad en un acuífero cársico litoral libre no confinado y la dirección del flujo fueron ya demostrados por Molerio (2006) y mencionados más arriba. De manera indirecta, ello implica una dependencia del tiempo del campo de propiedades físicas, como en otro momento se ha señalado (Molerio, 1984). El cambio en los controles y volúmenes de transporte de masas debido a este efecto son notables, según muestran los resultados del monitoreo de la composición química de las aguas en esos sistemas y soportan perfectamente los resultados de Wu et al. (2018?) y los de Trefry et al. (2019, 2020).

El concepto fundamental es que la frontera de marea es un potencial fluctuante periódico y su interacción con el gradiente general de flujo en un acuífero con conductividad hidráulica espacialmente heterogénea, ahora complicado con la pluma multifásica, puede dar lugar a una dinámica compleja de transporte. El modelo conceptual de Wu et al (2018?) se presenta en la Fig. 18.

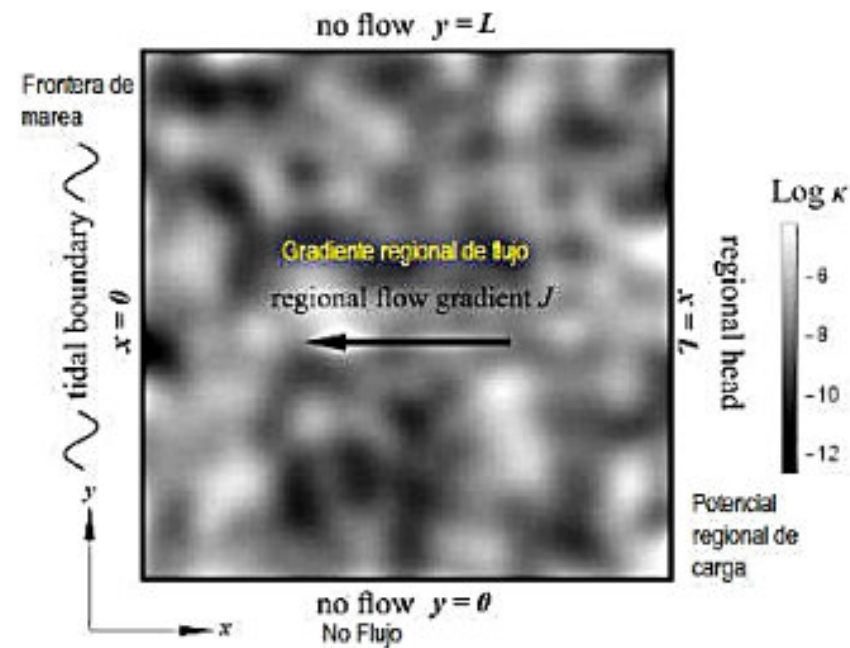


Fig. 18.. Esquema del modelo 2D de Wu et al. (2018?) con condiciones de borde y heterogeneidad espacial de K.

Después de algunas transformaciones, y a partir de modelo clásico de Bear (1972),

$$q = -K \nabla h$$

$$\varphi(h) = \varphi_{ref} + S(h - h_{ref})$$

Wu y sus coautores llegan a la ecuación general,

$$\frac{\partial h}{\partial y} |_{y=0} = \frac{\partial h}{\partial y} |_{y=L} = 0 \quad h(L, y, t) = J; h(0, y, t) = g(t)$$

Wu y sus coautores llegan a la ecuación general,

En las que,

h , es la presión de carga sobre un valor de referencia h_{ref}

$\bar{\varphi}$, la porosidad sobre un valor de referencia $\bar{\varphi}_{ref}$

S , almacenamiento considerado constante derivado de la migración de partículas sólidas en respuesta a los gradientes en h , tomando en cuenta que estas variaciones son debidas a compresión diferencial o consolidación

$K(x)$, es la conductividad hidráulica heterogénea pero isotrópica que varía en el espacio coordenado $x = (x, y)$

$g(t) = g_p e^{i\omega t}$, es la función periódica de forcing de marea

Esta función que es multimodal, Wu et al. (2018?) la simplifican tomando en cuenta que la multimodalidad complejiza mucho más el desarrollo de la dinámica de transporte en acuíferos con forcing transitorio, de manera que $g(t)$ es una función de Fourier unimodal con frecuencia ω , período $P=2\pi/\omega$ y amplitud g_p . De este modo se llega a la expresión siguiente,

$$q(x, t) = q_s(x) + q_p(x, t) \equiv q_s(x) + q_p(x) e^{i\omega t}$$

que describe el flujo darciano en un punto fijo del acuífero en un período de forcing,

$$P = \frac{2\pi}{\omega} \frac{\|q_p(x)\|}{\|q_{sp}(x, t)\|} > 0$$

con componentes periódicas y aperiódicas, estacionarias y la inversión ocurre en un punto x del acuífero durante el período de forzamiento (forcing) si la magnitud del flujo periódico en cualquier punto es mayor que la del flujo permanente,

$$\|q_p(x, t)\| > \|q_{sp}(x, t)\|$$

Flujo multifásico de densidad variable en el Polígono de inyección

Se dispone al menos de 13 grupos de modelos para resolver el asunto de la termodinámica de soluciones electrolíticas que eventualmente pueden ser aplicados para la solución del problema de la interacción acuosa bajo diferentes condiciones de temperatura y presión, así como de entorno geológico. Los experimentos de banco llevados a cabo por uno de los autores desde 2013 y los resultados de la modelación y ensayo en situaciones reales han llevado a preferir el Modelo de Pitzer sobre otros (Awam y Saleem, 2011) como se discutirá más adelante.

La selección de los métodos de disposición final de las aguas producidas es un tema clave en la gestión de campos de petróleo onshore, pues se requiere de conocer su movimiento y los efectos en el ambiente que los recibe. Básicamente, es necesario distinguir una serie de propiedades contextuales entre los cuales, la más importante, es la **compatibilidad geoquímica y física de las aguas producidas con el medio acuífero, especialmente la compatibilidad de tipo hidráulico** (Laaksoharju et al, 1995; Koretsky, 2000).

El problema es, entonces, resolver las ecuaciones de intercambio termo e hidrodinámica para determinadas condiciones iniciales y de contorno en acuíferos heterogéneos con anisotropía tridimensional progresiva (Molerio, 2013).

Las soluciones analíticas son las soluciones exactas a un valor límite del problema. Estas comprenden una ecuación o sistema de ecuaciones del diferencial gobernante que se resuelve para particulares condiciones iniciales y de borde. Frecuentemente se usan como herramientas para evaluar el destino y transporte de contaminantes en las aguas subterráneas. Muchos acercamientos se han usado en la literatura para derivar soluciones analíticas y semianalíticas (Domenico 1987, Domenico and Schwartz 1990, Domenico and Robbins 1985, Chuang 1998, Hunt 1985, Hunt 1978, Ogata and Banks, 1961). Basado en las condiciones iniciales y de contorno de nuestro problema, hemos asumido la solución analítica advectivo-dispersiva de Hunt (1978) para una fuente lineal (pozo de inyección) con carga química continua para periodos de tiempo definidos, incorporando la función de fuga del pozo.

Modelo analítico

Se asume (Fig. 19) que el flujo es unidireccional, continuo y uniforme en la dirección $+x$, y la dispersión en ambas direcciones (x ; y). Para una fuente lineal (pozo de inyección) donde la contribución del fluido se hace despreciable sobre las condiciones hidráulicas locales y son despreciables comparadas con las tasas de flujo regional, las entradas no afectan las propiedades hidráulicas del medio acuífero. Las diferencias de viscosidad y densidad entre las entradas y el acuífero son igualmente despreciables. Bajo estas condiciones la ecuación de gobierno para geometrías dispersivas en dos dimensiones, se puede plantear una solución general del tipo (de Marsily 1986):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

Donde:

$v = \frac{q}{n}$; n = porosidad; q = caudal específico.

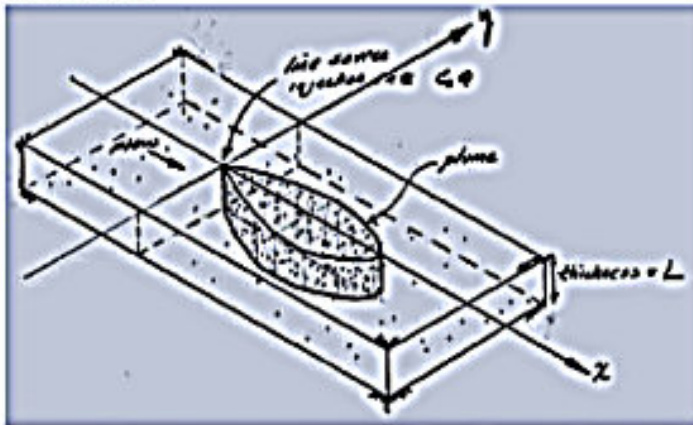


Fig. 19. Esquema de un sistema físico para tiempos mayores que cero. El acuífero es de extensión areal infinita.

Las condiciones iniciales, límites, y condiciones de conservación de masa son:

$$C(x, y, 0) = 0$$

$$C(\pm\infty, \pm\infty, t) = 0$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} C(x, y, t) dx dy = C_0 Q t$$

La solución es obtenida por la convolución en el tiempo de una solución para una fuente lineal elemental. Una función que satisface estas condiciones es (Hunt, 1978):

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 Q}{4\pi\eta L \sqrt{D_x D_y}} \exp\left(\frac{xy}{2D_x}\right) W(a, b)$$

Donde,

$W(a, b)$ es la función de fuga del pozo del acuífero.

$$a = \frac{R^2}{4D_x t}$$

$$b = \frac{Rv}{2D_x}$$

$$R^2 = \left[x^2 + y^2 \left(\frac{D_x}{D_y} \right) \right]$$

La función de fuga del acuífero puede ser evaluada numéricamente utilizando siguiente definición recursiva, o se pueden usarse aproximaciones eficaces.

$$W(a, b) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{E_{n+1}(a)}{n!} \left[\frac{b^2}{4a} \right]^n$$

$$E_{n+1}(a) = \frac{1}{n} [\exp(-a) - a E_n(a)]$$

$$E_1(a) = \int_{-\infty}^a \frac{\exp(-x)}{x} dx$$

donde la función $(E_1(a))$ es una simple integral exponencial.

Para este estudio, fue necesario definir la capacidad del horizonte acuífero para asimilar los caudales y la carga química de las aguas producidas a inyectar; y la identificación de un tiempo de tránsito aceptable para las aguas de mezcla que garantice la protección que fijen las regulaciones ambientales (Molerio 2015). De esta manera se definieron las características del campo físico del acuífero en cuestión, a fin de obtener valores reales que fueran utilizadas como variables de entrada del modelo.

Las características geoquímicas e hidrodinámicas de la zona propuesta para la inyección de aguas producidas se describen en Molerio (2015). De manera resumida, la zona experimental se encuentra en un sector costero donde se encontró un domo o núcleo de elevada salinidad enmarcado por la isopleta 20 000 mg/L. En el área domina un carso epigenético y, probablemente mixto epi-hipogenético, con una zona de recarga bien definida, extensa, y la presencia de al menos dos niveles acuíferos superpuestos, pero con fronteras hidráulicas, la distinción de esta frontera ha sido relativamente complicada. El desarrollo del karst local ha provocado la distorsión de la paleored fluvial de la cual aún se reconocen vestigios en paleovalles intercárcicos truncados por erosión remontante que han dado origen a valles muertos colapsados o truncados por cavernas (Molerio 2015).

Las propiedades del campo físico del acuífero fueron evaluadas a partir de los datos estimados en mediciones de terreno, datos de archivo e interpretación de imágenes aeroespaciales y otros recursos. El caudal de inyección se fijó a partir de datos de campo (Slug test) estimándose un caudal máximo de absorción estabilizado entre 2- 5 lps por pozo. El cálculo definitivo depende de los ensayos en los pozos de exploración propuestos (Molerio 2015). El coeficiente de dispersión longitudinal fue estimado por el método de Pickens and Grisak (1981) donde $\alpha_x = 0.1L$, donde L es la distancia a lo largo del dominio del modelo. La dispersividad transversal se asumió siguiendo los criterios de West et al (2007), que asume que $\alpha_y = 0.1\alpha_x$. las variables empleadas y las condiciones iniciales del modelo se describen en la Tabla 7.

Ingreso y disipación del estímulo: aceptabilidad ambiental

El modelo aplicado pretende describir los procesos de transporte de contaminantes en un acuífero cársico costero con aguas subterráneas someras con una elevada capacidad de recarga y bajos gradientes hidráulicos, y velocidades. Esto, permite asumir al acuífero como un medio continuo poroso. El mismo fue corrido bajo varios periodos finitos de inyección constante y para un grupo de elementos geoquímicos de interés. Se ha asumido para todos los modelos que todos los elementos son conservativos y no existen procesos de retardo, ni degradación. Por tanto, se modelan las condiciones más críticas teniendo en cuenta que el objetivo central es definir la distancia a la que se alcanzan los niveles de umbral de concentración definidos por la Legislación Ambiental vigente en Cuba (Tabla 8) y no la distancia o el momento en que la pluma contaminante se disipa en su totalidad.

Tabla 7. Variables y condiciones iniciales del modelo.

Constantes utilizados en los modelos	Unidades de medida	Valores
Concentración inicial (C_0)	mg/l	*
Caudal de inyección (Q)	m ³ /d	2395
Espesor del acuífero (S)	M	20
Porosidad (η)	Adimensional	0.1
Caudal específico (q)	Lpsm	0.2
Coefficiente de dispersión longitudinal (α_l)	M	50
Coefficiente de dispersión transversal (α_t)	m	5
Tiempo de inyección (t)	Días	*
Dispersión longitudinal (D_l)	m ² /d	10
Dispersión transversal (D_t)	m ² /d	1
Velocidad del agua subterránea (v)	m/s	0.22

* Depende del elemento geoquímico a modelar.

**Se asumieron los tiempos de 1; 5; 10; 20 años.

Tabla 8. Concentración de entrada de cada constituyente, el umbral de sensibilidad ambiental y el factor de dilución requerido para cumplir la legislación.

Constituyente del agua producida	Concentración de entrada	Umbral de sensibilidad ambiental	Factor de dilución requerido
Cd (mg/L)	0.26	0.01	26.00
Cu (mg/L)	0.2	0.05	4.00
Pb (mg/L)	0.23	0.1	2.30
V (mg/L)	0.3	0.01	30.00

Para los elementos Plomo y Vanadio, dominan concentraciones por encima del umbral de sensibilidad ambiental. La sincronía del comportamiento de Cu y Pb requerirá de estrictos controles de tratamiento (Taba 9, Fig. 20). El lag en los tenores de Vanadio debe estar asociado a la diferente movilidad del elemento.

Tabla 9. Concentraciones de metales y microelementos índice en las aguas producidas de salida de la planta de tratamiento del Yacimiento de prueba y umbrales de sensibilidad ambiental de referencia (CICA, 2003) para aguas altamente salinizadas.

Fecha	Cu	Cd	Pb	V
	Umbral de sensibilidad ambiental (aguas altamente salinizadas)			
	0.2	0.26	0.1	0.01
jun-20	0,015	0,01	0,18	0,019
ene-21	0,09	0,01	0,28	0,015
mar-21	0,021	0,01	0,24	0,03
may-21	0,02	0,01	0,21	0,01
ago-21	0,021	0,01	0,24	0,01
Aguas de mar (data propia)		0,193	0,239	
Agua de mar en la zona de influencia del emisario submarino (data propia)		0,186	0,219	
Embalse (agua dulce de referencia; data propia)		<0,006	<0,03	

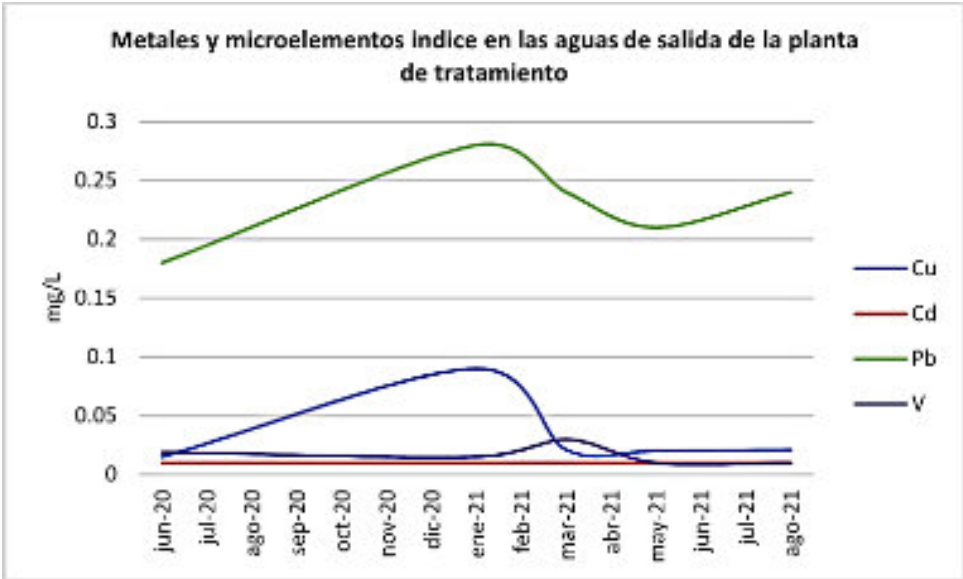


Fig. 20. Variación de la concentración de metales y microelementos índice en las aguas producidas de salida de la plata de tratamiento de referencia.

Claramente se establece que el proceso de adquisición de la composición en metales y microelementos índice en el área de estudio está asociado a los intercambios dominantes de las aguas altamente salinizadas, tanto marinas, como producidas.

Las características hidrodinámicas del acuífero juegan un importante papel en la disipación del impulso, sin embargo, el destino y forma de la pluma contaminante se deben básicamente a la dispersividad longitudinal y transversal. Además, las diferencias entre las diferentes plumas de dispersión de cada contaminante están regidas por los factores de dilución que requieren las restricciones legales y ambientales impuestas al proyecto.

Para el Cu, el Pb, y los hidrocarburos emulsionados, el modelo muestra que, para cualquier periodo de inyección, el umbral de sensibilidad es alcanzado antes de los 10 metros desde el punto de origen de la inyección. Esto se debe, principalmente a que la concentración de entrada es cercana al umbral de sensibilidad, por lo que los factores de dilución son muy bajos. En este sentido, es de esperar que, a cualquier tiempo de inyección, la distancia a la que se disipe el contaminante conservativo sea relativamente baja (Tabla 10).

Tabla 10. Distancia en metros a que los elementos geoquímicos inyectados alcanzan el umbral de sensibilidad para diferentes tiempos de inyección constante.

Elementos geoquímicos	Tiempos de inyección (años)			
	1	5	10	20
	Distancia en metros desde el origen			
Cu	10,00	10,00	10,00	10,00
Cd	70,00	170,00	250,00	250,00
Pb	10,00	10,00	10,00	10,00
V	70,00	220,00	320,00	330,00

En los casos particulares del Cd y el V, es de esperar una mayor variabilidad espacial atendiendo a los diferentes periodos de inyección modelados (Fig. 21). Resulta muy interesante que, a tiempos de inyección superiores a los 10 años, la

distancia a la cual se alcanza el umbral de sensibilidad del Cd es la misma, aun cuando la forma de la pluma varia a valores inferiores al límite ambiental definido.

Por su parte el Vanadio, presenta la mayor movilidad y solubilidad en las aguas subterráneas, porque transita con facilidad por los diferentes estados de oxidación que van de -1 a +5, pasando de un estado a otro por la transferencia de un electrón a través de procesos de óxido-reducción. Su alta concentración relativa en las aguas producidas se debe a que es uno de los elementos traza presente en los hidrocarburos. Por consiguiente, requiere de un elevado factor de dilución para alcanzar los límites fijados por la legislación.

De acuerdo con los resultados de la modelación, al año de inyección, estos elementos (Cd y V) alcanzan los valores de umbral a la misma distancia (70 metros en la dirección +X) desde el origen de la inyección, y se dispersan lateralmente hasta los 10 metros a ambos lados de la fuente. A partir de los 5 años de inyección constante, el comportamiento varía notablemente en la dirección del gradiente, mientras solo se expande 2 metros más en la dirección longitudinal (25 y 27 metros respectivamente). A los 10 y 20 años, el vanadio varía sus concentraciones hasta alcanzar una distancia máxima de 330 metros (+x), mientras en la dirección +y; -y se mantiene a los 27 metros. A partir de este periodo de tiempo de inyección constante, las concentraciones alcanzan el valor de umbral a estas distancias, aun cuando sigue variando a valores menores.

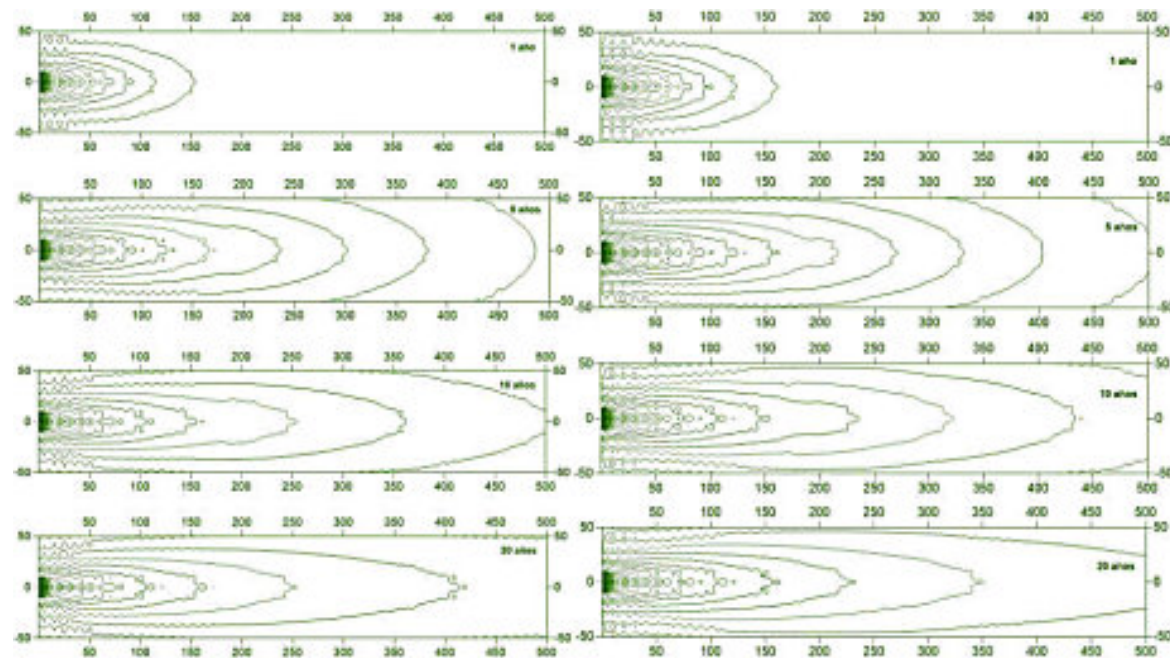


Fig. 21. Modelo 2D del destino y forma de la pluma contaminante del Cd para un periodo finitos de inyección constante (1; 5; 10; 20 años). En rojo el umbral de sensibilidad de la Legislación Ambiental vigente. Cadmio (Cd) (Izquierda); Vanadio (V) (Derecha).

CONCLUSIONES

La posibilidad de utilizar pozos de inyección con baja o nula presión para la disposición final de aguas de capa tratadas de yacimientos gasopetrolíferos onshore de la Franja de Crudos del Norte de La Habana-Matanzas (FCP) es una alternativa viable utilizando el acuífero cársico litoral somero carsificado salinizado por intrusión marina con mineralizaciones superiores a los 10000 mg/L que se extiende a lo largo del litoral donde tienen lugar las operaciones gasopetrolíferas.

Esta alternativa representa un cambio rotundo en la matriz de disposición final de las aguas de capa tratadas y su implementación estaría en dependencia de la aceptabilidad ambiental del acuífero para recibir determinados volúmenes de las aguas tratadas que se basa en el Modelo de compatibilidad de las aguas subterráneas de acuíferos cársicos litorales someros para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados

fundamentada en la Teoría de la Interacción Iónica Pitzer, en la Teoría de los Miembros Terminales de las Aguas Terrestres de Cuba y en un conjunto de propiedades físicas, hidráulicas, geoquímicas e hidrodinámicas del acuífero.

La aplicación de un modelo analítico del tipo advectivo-dispersivo en 2D ha permitido conocer la forma y extensión de la pluma de dispersión, de un grupo selecto de contaminantes conservativos que se pretende inyectar en un acuífero cársico costero somero salinizado. Los contaminantes provienen de las aguas producidas de los yacimientos gasopetrolíferos carbonatados y deben alcanzar el umbral de sensibilidad impuesto por la Legislación Ambiental Cubana, por lo que presentan diferentes factores de dilución que restringen el alcance máximo de la pluma para los diferentes periodos de inyección continua simulados. Por su parte, las particularidades hidrogeológicas del acuífero permiten asimilar la carga química a inyectar permitiendo la disipación del impulso, mientras las dispersividades calculadas definen el destino y forma de la pluma contaminante.

Los resultados permiten concluir que es factible la inyección de las concentraciones propuestas, pues el caso más crítico (20 años de inyección constante sin degradación ni retardo) alcanza el umbral de sensibilidad ambiental a distancias de 10 metros (Pb, Cu,) y 250 y 330, para el Cd y el V respectivamente, en un acuífero donde los tiempos de transito estimados son favorables.

REFERENCIAS

Amado G., E., L.H. Blanco (2010): **Aplicación del Modelo de Interacción Iónica de Pitzer a coeficientes osmóticos de soluciones de KCl en función de la temperatura.** Revista BISTUA :31-46

Anderson, G.M. (2005): **Thermodynamics of Natural Systems.** Cambridge Univ. Press, 647:

Antigüedad, I.; M. Arellano; M. L. Calvache; M. V. Esteller; J. R. Fagundo; M. A. Gómez; A. González; A. González; J. Gutiérrez; H. Llanusa; M. López; L. F. Molerio; T. Morales; I. Morell; I. Mugerza & A. Pulido (1997): **Curso Avanzado sobre Contaminación de Aguas Subterráneas. Monitoreo, Evaluación, Recuperación.** 2 vols., Castellón, 324:

Arellano, D.M.; L.F. Molerio León & A. Santos Sanamé (1993): **Dinámica del Flujo Regional en el Macizo Metamórfico de la Isla de la Juventud.**in/ Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 1994, IAEA TECDOC-835, Viena, :175-194

Awan, J.J., M. Saleem (2011): **An overview of the thermodynamic models for acid gases in electrolyte solutions.** Jour. Fac. Eng. Tech. Univ. Punjab, Pakistan:13-29

Bear, J. (1972): **Dynamics of fluids in porous media.** Dover edition, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York,756:

Boesch, D.F., N.N. Rabalais (1989): **Produced waters in sensitive coastal habitats. An analysis of impacts.** Central Coast Gulf of Mexico. Lousiana Univ. Marine Consortium. Chauvin, Lousiana, 156:

Back, W. (1960): **Origin of hydrochemical facies of ground water in the Atlantic Coastal Plain.** Internatl. Geol. Cong., Geochemical cycles: Internatl. Geol. Cong., 21st Copenhagen 1960, Proc., pt. 1:87-95

Back, W. (1966): **Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part of Atlantic Coastal Plain.** Geological Survey Professional Paper 498-A, Washington, 42:

Back, W., B.B. Hanshaw (1970): **Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan.** Journal of Hydrology, v. 10:330–368

Back, W., B.B. Hanshaw, L.N. Plummer, P.H. Rahn, C.T. Rightmire, M. Rubin (1983): **Process and rate of dedolomitization: mass transfer and C14 dating in a regional carbonate aquifer**. Geol.Soc. Am. Bull. 94 (12), 1415-1429.

Back, W., B.B. Hanshaw, J.N. Van Driel (1984): **Role of groundwater in shaping the eastern coastline of the Yucatan Peninsula, Mexico**. In: **Groundwater as a Geomorphic Agent** (ed. By R.G. LaFleur), 281-293. Allen and Unwin Inc., Boston.

Back, W., B.B. Hanshaw (1971): **Rates of physical and chemical processes in a carbonate aquifer**. Repr. Advances in Chemistry Series 106

Carnahan, C.L. (1976): **Non-equilibrium thermodynamics of groundwater flow systems: symmetry properties of phenomenological coefficients and considerations of hydrodynamic dispersion**. Jour. Hydrol. 31:125-150

Cartwright, K. (1968): **Temperature prospecting for shallow glacial and alluvial aquifers in Illinois**. III. Geol Surv. Circ. 433, 41:

Cartwright, K. (1974): **Tracing shallow groundwater systems by soil temperatures**. Water Resour. Res. 10:847-855

Chuang, L. (1998): **A guidance system for choosing analytical contaminant transport models**. PhD Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.

Cuba. Oficina Nacional de Normalización (2012): NC-27. **Norma Cubana Obligatoria. Vertimiento de residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado**. Especificaciones.

Cuba. Oficina Nacional de Normalización (2017a): **NC-827. Obligatoria. Agua potable. Requisitos sanitarios**.

Cuba. Oficina Nacional de Normalización (2017b): **NC-1192. Determinación de la zona de protección sanitaria en fuentes de abasto de aguas subterráneas**

Cuba. Oficina Nacional de Normalización (2017c): **NC-1229. Protección del medio ambiente – hidrosfera – clasificación de la utilización de las aguas interiores**.

CUPET (1995): **Regulación RA 02/95. Regulaciones Técnico-ambientales para el tratamiento y disposición del agua producida**.

De Marsily, G. (1986): **Quantitative hydrogeology**: Orlando, Academic Press, 440 p.

Domenico, P.A. (1987): **An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species**. Journal of Hydrology 91, 49–58.

Domenico, P.A., y F.W. Schwartz. (1990): **Physical and Chemical Hydrology**. New York: John Wiley & Sons Inc.

Domenico, P.A., y G.A. Robbins. 1985. **A new method of contaminant plume analysis**. GroundWater 23, no. 4: 476–485.

Dreybrodt, W. (1988): **Processes in karst system. Physics, Chemistry and Geology**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 288:

Fitts, D.D. (1962): **Nonequilibrium Thermodynamics**. McGraw-Hill, New York, 173:

Engelen, G.R., G.P. Jones (1986): **Developments in the analysis of groundwater flow systems**. IAHSPubl.163, Wallingford, 356:

Farfán González, H., L.F. Molerio-León. (2020): **Modelo analítico advectivo-dispersivo en 2D para la inyección de aguas producidas en yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos someros salinizados**. Argentina Subterránea, 20(47-48):79-82. <https://www.researchgate.net/publication/345344540>

FAO (1979): **Groundwater Pollution. Technology, Economics and Management**. FAO Irrig. Drain. Paper 38, Roma, 137:

Foster, S.S.D., R. Hirata (1988): **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. CEPIS Technical Report (WHO-PAHOCEPIS, Lima-Peru).

Fournier, M, N. Massei, M. Bakalowicz, J.-P. Dupont (2007): **Use of univariate clustering to identify transport modalities in karst aquifers**. C. R. Geoscience 339 (2007) 622–631

Hanshaw, B.B., W. Back (1979): **Major geochemical processes in the evolution of carbonate-aquifer systems**. J. Hydrol. 43, 287-312.

Hanshaw, B.B., W. Back, R.G. Deike (1981): **A geochemical hypothesis for dolomitization by groundwater**. Repr. Economic Geology, 66 (5), August:710-724

Hunt, B. (1978): **Dispersive sources in uniform groundwater flow**. J. of Hydraulics, ASCE, Vol 104. No. HY1, pp 75-85.

IGP (2013): **Léxico Estratigráfico de Cuba**. Tercera Versión, Inst. Geol. Pal., Srv. Geol. Cuba, La Habana, 458 :

Jackson, R. E. (1986): **Pollution et Protection des aquifères**. UNESCO, Etudes et Rep. Hydrol., Paris, 434 pp.

Jolankái, G. (1992): **Hydrological, chemical and biological processes of contaminant transformation and transport in river and lake systems**. UNESCO, Tech. Doc. Hydrol., Paris 147:

Kim, H. T., W. J. Frederick (1988a): **Evaluation of Pitzer Ion Interaction Parameters of Aqueous Electrolytes at 25°C. 1. Single Salt Parameters**. J. Chem. Eng. Data 33 :177-184.

Kamensky, G.N. (1958): **Hydrochemical zoning in the distribution of underground waters**. Proc. Symp. Ground Water, Pub. 4, 281

Kim, H. T., W. J. Frederick (1988b): **Evaluation of Pitzer Ion Interaction Parameters of Aqueous Electrolytes at 25°C. 2. Ternary Mixing Parameters**. J. Chem. Eng. Data 33, 278-283. Innovación, Año 20, Nº 1 (2008) :21-31

Kondepudi, D., I. Prigogine (1999): **Modern Thermodynamics, from Heat Engines to Dissipative Structures**. Wiley, New York.

Koretsky, C. (2000): **The significance of surface complexation reactions in hydrologic systems: a geochemist's perspective**. Journal of Hydrology, 230:127-171.

Laaksoharju, M.; Degueldre, C. and Skarman, C. (1995). **Studies and their importance for repository performance assessment**. SKB Technical Report 95-25. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, Sweden, 68:

March Delgado, C. & L.F. Molerio León (1987): **A General Approach to an Algorithm for Groundwater Flow in Karstic Aquifers. Hydro- And Thermodynamical Considerations**. Internatl. Symp. Groundwater Monitoring and Management, Dresden, GDR, 21:

Massei, N., B.J. Mahler, M. Bakalowicz, M. Fournier, J.P. Dupont (2007): **Quantitative Interpretation of Specific Conductance Frequency Distributions in Karst**. GROUND WATER 45(3)—May–June:288–293

Molerio León, Leslie F. (1984): **Dependencia del Tiempo de la Transmisividad y el almacenamiento en Acuíferos Cársicos.** *Voluntad Hidráulica*, La Habana, (65):32-38

Molerio León, Leslie F. (1985): **Dominios de Flujo y Jerarquización del Espacio en Acuíferos Cársicos.** Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana: 54; In/Núñez Jiménez, A. (1990): **Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba.** Tomo II, Imprenta Central de las FAR, La Habana, :322, <https://www.researchgate.net/publication/344398777>

Molerio León, L. F. (1992a): **Composición Química e Isotópica de las Aguas de Lluvia de Cuba.** II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba:20-21

Molerio León, Leslie F. (1992b): **Mareas Terrestres y Oceánicas en Acuíferos Cársicos Costeros.** II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba,:17

Molerio León, Leslie F. (1992c): **Modelo de Transporte de Masa en la Zona No Saturada de los Acuíferos Cársicos. 1/Algoritmo ADRIANA (versión 2.91).** 1er Taller Iberoamericano de Informática y Geociencias, Acad. Cienc. Cuba, La Habana:34

Molerio León, Leslie F. (1992d): **Procesos de Transporte de Masa en la Zona No Saturada de los Acuíferos Cársicos Tropicales.** GTICEK. Taller Internac. sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló,:1-15.

Molerio León, L. F. (1994a): **Intrusión marina en Acuíferos Cársicos.** Unesco, Universidad Nacional de La Plata, 366:

Molerio León, Leslie F. (1994b): **Isotopic and Geochemical Regionalization of a Tropical Karst Aquifer.** Internatl. Symp. Isotopes in Water Resources Management; OIEA, Vienna, Austria, Paper IAEA-SM-336/88P, 6:

Molerio León, L. F. (2000): **Design of Seawater Intrusion Early Warning Systems in Coastal Karstic Aquifers: A Multivariate Approach.** Unesco Project. 3.2.

Molerio León, L.F. (2006): **Efecto de la anisotropía de la transmisividad sobre el campo de flujo en un acuífero cársico litoral.** Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (108), Madrid, Marzo: 77-80.

Molerio León, L.F. (2012): **Hidrología de Trazadores en la gestión ambiental de yacimientos de petróleo onshore.** Mapping Interactivo. No. 154, Julio-Agosto, 2012

Molerio León, L.F. (2013a): **Ecuaciones de intercambiatermohidrodinámicoentremedioscontinuosmúltiplesenelkarst y sus consecuencias ambientales.** Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. Año 13, No.24, 2012 ISSN-1683-8904, La Habana, 15: <http://ama.redciencia.cu/articulos.php?sid=91529a91e366de61e4ac7b8e3f27fb89>

Molerio León, L.F. (2013b): **Morfodinámica e hidrodinámica del karst según un modelo de interacción entre medios continuos múltiples (2): Ecuaciones de intercambio.** *Mapping Latino*, 19 agosto 2013, 20: <http://mappinglatino.com/blog/2013/08/19/morfodinmica-e-hidrodinmica-del-karst-segn-un-modelo-de-interaccin-entre-medios-continuos-mltiples-2-ecuaciones-de-intercambio/>

Molerio León, L.F. (2015): **Disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados.** Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2015, Vol.16, No.1, pp.75-87, ISSN 1729-3790

Molerio-León, L.F. (2017): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados. 3. Transferencia de calor.** Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente,17 (33), julio-diciembre 2017

Molerio-León, L.F. (2018): **Neotectónica y patrones de cavernamiento en Punta Guanós, Matanzas, Cuba (IV). Estabilidad estructural del macizo.** Gota a Gota, nº 15: 58-63. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.) <https://sites.google.com/.../espe.../home/gota-a-gota-no-14-2017>

Molerio-León, L.F. (2019): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de Yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos Litorales someros salinizados.** Octava Convención de Ciencias de la Tierra, Geociencias'2019. XIII Congreso de Geología (GEOLOGÍA'2019). V Taller sobre Aguas subterráneas, Gestión y Contaminación GEO11-CE1. Resumen. Conferencia especial, La Habana: 178

Molerio-León, L.F. (2020a): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos someros salinizados. 1. Ecuaciones de gobierno.** Argentina Subterránea, 20(47-48):71-74. <https://www.researchgate.net/publication/345344234>

Molerio-León, L.F. (2020b): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos someros salinizados. 2. Aplicabilidad del modelo.** Argentina Subterránea, 20(47-48):75-77. <https://www.researchgate.net/publication/345344524>

Molerio-León, L.F. (2020c): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba: I. Aplicaciones del nomograma modificado de Schoeller.** Gota a gota, 21: 81-88. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.). https://drive.google.com/file/d/1-7T5OrVnMe_rIEyVuA2ZuBtyrR1oAZ4V/view

Molerio-León, L.F. (2020d): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba: II. Aplicaciones del nomograma modificado de Schoeller – Metodología e Interpretación.** Gota a gota, (22): 13-17. <https://drive.google.com/file/d/10NQ25dn1EoGvwj71fxFTaTwPUL3q6Gv7/view> <https://www.researchgate.net/publication/345344552>

Molerio-León, L.F. (2020e): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba: 3. Composición isotópica de las aguas de lluvia.** Gota a gota, nº 22: 70-82 <https://www.researchgate.net/publication/348402581>

Molerio-León, L.F. (2021a): **Petróleo y Karst: Bases teóricas de una tecnología para la disposición final de aguas producidas tratadas en acuíferos cársicos someros y cuerpos de agua salinizados.** La Habana, 102: <http://fade.smartnec.com/images/prod/lyD9XLDi9F6eaoKQoCoRBarRn4rNvd.pdf> <https://www.researchgate.net/publication/351274801>

Molerio-León, L.F. (2021b): **Petróleo y karst 2: el papel del cavernamiento en el control de la migración de la inyección somera de aguas producidas en medios cársicos.** Argentina Subterránea 21(50) OCTUBRE-NOVIEMBRE 2021:21-46, ISSN 1851-894x <http://www.fade.org.ar/Bibliografia.html>, <https://www.researchgate.net/publication/356893720>

Molerio-León, L.F. (2021ccend): **Karst en fracturas de distensión del Litoral Norte de Artemisa-Matanzas: Consecuencias ingeniero-geológicas e hidrogeológicas.** La Habana, 25:, Preprint. <https://www.researchgate.net/publication/352015257>, DOI: 10.13140/RG.2.2.14254.64325

Molerio-León, L.F. (2022): **Métodos no convencionales de prospección de petróleo y gas: karst hipogénicos de Cuba Occidental.** Revista Maya de Geociencias, UNAM, Marzo :52-59 <https://www.researchgate.net/publication/358924299>

Molerio León, Leslie F.; E. Fariñas Padrón & O. Azcue Manso (1990): **Procesos Termodinámicos en la Cueva de La Virgen, Ciudad de La Habana, Cuba**. Congr. 50 Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana: 53

Molerio León, L.F; M.G. Guerra Oliva, R.M. Leal (2013): **Modelo Difusivo de Transporte de Masa (Algoritmo Adriana, Versión 2.91) y Curvas de Retención de Humedad en la Zona No Saturada de los acuíferos cársicos (Modelo RETC). Aplicación a las cuevas del tercio superior del curso subterráneo del río San Antonio, Artemisa, Cuba**. Mapping Latino. 23 Septiembre 2013, 51:<http://mappinglatino.com/blog/2013/09/23/modelo-difusivo-de-transporte-de-masa-algoritmo-adriana-versin-2-91-y-curvas-de-retencion-de-humedad-en-la-zona-no-saturada-de-los-acuferos-crsicos-modelo-retc-apl/>

Molerio León, L.F., Rebeca Hernández Díaz, Isis Fernández Gómez, Antonio González Ramón, Vladimir Otero Collazo, Oriol Chávez Bonora, Marian Alonso (2021): **Patrones geoquímicos e isotópicos en un acuífero cársico litoral: gestión de las aguas subterráneas en el Yacimiento Gasopetrolífero de Boca de Jaruco, Cuba**. IX CONVENCIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA – GEOCIENCIAS 2021

Nagy, I. (1976): **Contaminación de acuíferos y su control**. Curso Post Univ. Sobre Explotación de Acuíferos, La Habana, 106:

Nieto-Villar, J.M., E. Izquierdo-Kulich, J.A. Betancourt-Mar, E. Tejera (2013): **Complejidad y auto-organización de patrones naturales**. Editorial UH, La Habana, 168:

Ogata, A. and Banks, R.B. (1961): **Solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media**. U.S. Geological Survey Professional Paper 411-A. 7p.

Onsager, I. (1931a): **Reciprocal Relations in Irreversible Processes I**. Phys. Rev, 37:405-426

Onsager, I. (1931a): **Reciprocal Relations in Irreversible Processes II**. Phys. Rev, 38:2265-2279

Pickens, J., and G. Grisak. (1981). **Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer**. Water Resources Research 17, no. 4: 1191–1211.

Pitzer K. S. (1979): **Theory: ion interaction approach**, en: **Activity coefficients in electrolyte solutions**, R. M. Pytkowitz [Ed], CRC Press, Boca Raton: 157-208.

Pitzer K. S. (1987): **A thermodynamic model for aqueous solutions of liquid-like density**, en: **Thermodynamic modeling of geological materials: Minerals, fluids and melts**. Reviews in Mineralogy, I. S. E. Carmichael y H. P. Eugster .[Eds.]:97-142.

Pitzer, K. S. (1991): **Activity Coefficients in Electrolyte Solutions**, 2nd ed.; Pitzer, K. S., Ed.; CRS Press.

Plummer, L.N. (1977): **Defining reactions and mass transfer in part of the Floridan Aquifer**. Wat. Resour. Res. 13 (5), 80:1-812.

Plummer, L.N., W. Back (1980): **The mass balance approach: application to interpreting the chemical evolution of hydrologic systems**. Amer. Jour. Sci, 280:130-142

Prigogine, I. (1955): **Introduction to the Thermodynamics of Irreversible Processes**. American Lecture Series, Vol.185, Charles C. Thomas Publishers, Springfield

Prigogine, I. (1967): **Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes**. Wiley, New York, 147:

Schoeller, H. (1941): **Les modifications de la composition chimique de léau dans une même nappe**. Ass. Internatl. Hydrol. Scientifique, Ass. Oslo:124-129

Schoeller, H. (1948): **L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses**. Bull. Soc. Géol. Fr. XI, (5): 267-289

Schoeller, H. (1956): **Geochimie des eaux souterraines: Application aux eaux du gisement de petrole**. Technip, Paris, 213:

Schoeller, H. (1959): **Arid Zone Hydrology Recent Developments**. Arid Zone Research-XII. UNESCO, Paris, 125:

Schoeller, H. (1962): **Les Eaux Souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, Exploitation et Évaluation des Ressources**. Mason et Cie, Paris, 642:

Shenk, T.M., A.B. Franklin (2011): **Modeling in Natural Resource Management. Development, Interpretation and Application**. Island Press, Washington, 223:

Stallman, R.W. (1960): **Notes on the use of temperature data for computing groundwater velocity**. 6th assembly on Hydraulics. Rep 3:1-7. Soc. Hydrotech de France, Nancy, France (reproducido en Bentall, R. [Ed] (1963): **Methods of collecting and interpreting ground water data**. U.S.Geol.Surv.Water Supply Pap. 1544-H-36-46

Struckmeier, W.F. y J. Margat (1995): **Hydrogeological Maps. A Guide and a Standard Legend**. Internatl. Ass. Hydrogeol, Verlag, Hannover, 177:

Trefry, M.G., D.R. Lester, G. Metcalf, J. Wu (2019): **Temporal fluctuations and poroelasticity can generate chaotic advection in natural groundwater systems**. Water Resour. Research. 55,

Trefry, M.G., D.R. Lester, G. Metcalf, J. Wu (2020): **Lagrangian complexity persists with multimodal systems**. Preprint. Transport in Porous Media. 37: ResearchGate, <https://researchgate.net/publication/340883271>
Van de Weerd, H.; Leijnse, A. and van Riemsdijk, W.H. 1998. **Transport of reactive colloids and contaminants in groundwater: effect of nonlinear kinetic interactions**. Journal of Contaminant Hydrology, 32:313-331

Weber, C.F. .2000. **Calculation of Pitzer Parameters at High Ionic Strengths**. Ind. Eng.Chem. Res. 39: 4422-4426

West, MR., Kueper, BH., Unga, MJ (2007): **On the Use and Error of Approximation in the Domenico (1987) Solution**. Groundwater. Vol. 45, No. 2: 126–135

Wu, J., D. R. Lester, M. G. Trefry, G. Metcalfe (2018?): **When do complex transport dynamics arise in natural groundwater systems?** Confidential manuscript submitted to Water Resources Research, 54:

Yigui, LI .2006. **Recent Advances in Study on Thermodynamic Models for Real Systems Including Electrolytes**. Tsinghua Science and Technology, 11 (2):181-187

INYECCIÓN SOMERA DE AGUAS PRODUCIDAS DE YACIMIENTOS DE PETRÓLEO: 2. COMPLEMENTOS DE LA TECNOLOGÍA

Leslie F. Molerio León

INVERSIONES GAMMA, S.A.,

Apartado 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba;
especialistaprincipal@gmail.com; ORCID 0000-0001-9667-2258

RESUMEN

Este artículo describe los procesos físicos y geoquímicos en el acuífero receptor como consecuencia de la inyección somera de aguas producidas de yacimientos gasopetrolíferos. En el caso estudiado, la mezcla de las aguas producidas, con las del acuífero provocará insaturación de la solución y un incremento de sus propiedades corrosivas. Otro tanto ocurrirá en la mezcla con las aguas de mar. Para ello, es necesario tener en cuenta el modo en que influyen la heterogeneidad y la anisotropía del sistema acuífero. En cualquier punto del acuífero, la anisotropía representa la variación de la conductividad hidráulica con la dirección y se diferencia de la heterogeneidad, que se refiere a la variación de un punto a otro (Palmer, 1999). La presencia de cavernas en el dominio de flujo de la inyección somera es la principal causa de la heterogeneidad y anisotropía a lo largo de la línea de flujo seleccionada para aplicar la tecnología. La corrosión o incrustación por agua está asociada a la concentración de CO_2 libre, el cual influye en el comportamiento del carbonato de calcio (CaCO_3). Un agua en equilibrio químico mantiene la concentración adecuada de CO_2 de tal forma que no se remueve la película de CaCO_3 que protege a los materiales de la corrosión, ni se precipita CaCO_3 . Los resultados muestran que las aguas subterráneas se encuentran aguas insaturadas, con tendencia a ser agresivas en casi todos los casos.

Es especialmente importante definir el efecto de la conducción, convección, evaporación, condensación en los conductos cárnicos, la tasa de flujo y la radiación en los aportes y los flujos superficiales y subterráneos y la mezcla entre ambos. El papel de conductos saturados completamente no se conoce y es tema de investigación que, en este reporte, se ha examinado con más detalle en cuanto concierne al efecto sobre la insaturación de las soluciones carbonatadas que discurren por el acuífero y su capacidad para insaturarse y convertirse nuevamente en aguas agresivas. En este sentido, tal y como enunció Thrailkill (1968 (y también retomado por Back y Hanshaw, 1970), las lluvias cálidas de verano pueden provocar que las aguas que se infiltren naturalmente tengan una temperatura superior las del acuífero —como también es el caso de la inyección somera, vía por la cual ingresan artificialmente— por lo que en caso de que las aguas ingresen saturadas respecto a la cacita y se enfríen en un ambiente con dióxido de carbono disponible, se producirá un efecto de insaturación en el cual las aguas más frías aportan una fuente adicional para adquirir más CO_2 y, por ende, de disolver más calcita en el acuífero.

INTRODUCCIÓN

En una contribución anterior se describieron los principios de la inyección somera de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos en acuíferos someros salinizados, como un recurso en el cual, satisfaciendo ciertos requerimientos de aceptabilidad ambiental de las aguas en estos cuerpos receptores, podría considerarse como una alternativa válida para la disposición final de las aguas producidas a costos mínimos de operación, mantenimiento y monitoreo. El polígono de ensayo en la Franja Norte de Crudos Habana – Matanzas, en Cuba occidental.

La metodología de la tecnología propuesta por Molerio (2015) para su aplicación en acuíferos cárnicos salinizados que suprayacen las instalaciones de tierra de la Franja de Crudos implica un conjunto de acciones del tipo siguiente:

1. Definición de la compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y los fluidos del horizonte receptor
2. Definición de la compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y la litología de las zonas de inyección y los sellos o capas confinantes
3. Evaluación de la capacidad calorífica del agua producida a inyectar
4. Determinación cuantitativa y de los efectos geoquímicos de la concentración de los hidrocarburos dispersos y la distribución de los particulados y los sólidos suspendidos de las aguas a inyectar
5. Determinación de la capacidad del horizonte acuífero para asimilar los caudales y la carga química de las aguas producidas a inyectar
6. Identificación cuantitativa de un tiempo de tránsito aceptable para las aguas de mezcla que garantice la protección que fijen las regulaciones ambientales
7. Definición de los patrones de circulación hasta el punto de descarga en el ecotono litoral o submarino y la capacidad de asimilación del cuerpo marino del fluido inyectado
8. Determinación de las propiedades agresivas o incrustantes de la mezcla de agua resultante

9. Los parámetros hidrodinámicos de diseño del sistema de inyección considerarán los siguientes indicadores:
 - a. Máxima tasa de inyección.
 - b. Máxima presión prevista de inyección.
 - c. Temperatura de inyección del fluido.
 - d. Composición físico química y propiedades termo hidrodinámicas del fluido de inyección.
 - e. Volúmenes de inyección.
 - f. La corrosión que puede producir el fluido a inyectar.
 - g. La reducción del colapso de las camisas debido a la tensión y compresión.
 - h. La eficiencia de los sellos respecto a los efectos de expansión y contracción del entubado debido al eventual ciclo térmico que pudiera estar involucrado.
 - i. La fracturación hidráulica de la capa confinante, que depende de la presión ejercida por el líquido de inyección.
 - j. El radio de influencia del volumen inyectado.

Los antecedentes históricos de la tecnología cuya aplicación se discute en este proyecto ya fueron adelantados en artículos anteriores (Molerio, Martínez y Sardiñas, 2021) del que solamente se desea recalcar lo siguiente.

La aceptabilidad ambiental de la inyección somera, está definida como la capacidad del sistema hidrológico natural para asimilar —mediante mezcla o dilución— aguas externas con determinada composición física y química de manera que los compuestos resultantes no alteren la organización y dinámica del sistema de flujo en términos de la estructura del campo de propiedades físicas del acuífero, las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las aguas que afecten el flujo natural, el intercambio entre diferentes sistemas de flujo y otras masas de agua ni la biota asociada al ecosistema.

Ella se expresa en los siguientes indicadores:

- ☐ Compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y los fluidos del horizonte receptor
- ☐ Compatibilidad entre las aguas producidas a inyectar y la litología de las zonas de inyección y los sellos o capas confinantes
- ☐ La capacidad calorífica del agua producida a inyectar
- ☐ La concentración de los hidrocarburos dispersos y la distribución de los particulados y los sólidos suspendidos de las aguas a inyectar
- ☐ Capacidad del horizonte acuífero para asimilar los caudales y la carga química de las aguas producidas a inyectar
- ☐ La identificación de un tiempo de tránsito aceptable para las aguas de mezcla que garantice la protección que fijen las regulaciones ambientales
- ☐ Propiedades agresivas o incrustantes de la mezcla de agua resultante

Resueltos los problemas de tipo hidrodinámico y geoquímico antes descritos se pasa a la segunda fase, que es la construcción de los pozos de inyección. Esto se logra mediante el adecuado rimado (ampliación de diámetro), cementación, instalación de filtros y desarrollo de los pozos que se proyecten. Esto es tan importante como todo lo anterior porque resulta la solución ingeniera del problema de la disposición final.

Entre los parámetros de diseño, además de la profundidad de los pozos y la distribución de anillos, filtros, camisas ciegas y otro tipo de entubado, así como la cementación y los colchones eventuales de grava, tenemos los siguientes:

- ☐ Máxima tasa de inyección.
- ☐ Máxima presión prevista de inyección.
- ☐ Temperatura de inyección del fluido.
- ☐ Composición físico química y propiedades termo hidrodinámicas del fluido de inyección.
- ☐ Volúmenes de inyección.

Además, es necesario velar por conservar dentro de los límites aceptables, los siguientes temas que también hay que estudiar a partir de la data hidrogeológica:

- La corrosión que puede producir el fluido a inyectar.
- La reducción del colapso de las camisas debido a la tensión y compresión.
- La eficiencia de los sellos respecto a los efectos de expansión y contracción del entubado debido al eventual ciclo térmico que pudiera estar involucrado.
- La fracturación hidráulica de la capa confinante, que depende de la presión ejercida por el líquido de inyección.
- El radio de influencia del volumen inyectado.

Los fundamentos teóricos que han sustentado el desarrollo del modelo teórico y luego, su ensayo en un sector de la Franja de Crudos del Norte de La Habana-Matanzas parten de la identificación de patrones de la composición química e isotópica de las aguas subterráneas de Cuba y la caracterización y desarrollo de la metodología para la caracterización de los miembros terminales de las mismas desarrollado por el autor en 1991 (Molerio, 1992a). En 2001 se evaluó por primera vez la aplicación de la Teoría de las Interacciones Iónicas de Pitzer (1979 y ss) a la solución la inyección de aguas de capa producidas en el yacimiento Boca de Jaruco, al oeste de La Habana y, en 2003, del problema de la disposición final de las aguas de sentina en la Base de Supertanqueros de Matanzas. En 2005 se evaluó como alternativa en Puerto Escondido simultaneada con la solución de conflicto de abasto con el Campismo Popular.

La posibilidad de utilizar pozos someros en acuíferos cársicos salinizados y poco productivos para sustituir la inyección profunda, minimizar los costes energéticos y maximizar las operaciones de vigilancia y control ambiental ha sido estudiada sistemáticamente por el coautor Molerio y, en varias publicaciones se han fundamentado y descrito los principios de la metodología aplicada a la solución de estos problemas, basada en una adaptación de los principios de la Teoría de Pitzer sobre transporte reactivo en salmueras de petróleo y marinas, básicamente en ecotonos de interface tierra-océano pero que, por la física del proceso pueden evaluarse en ambientes de este tipo en zonas de tierra adentro.

En la aplicación de esta técnica ha sido necesario resolver un grupo importante de problemas teóricos y de su aplicación ingeniera, tales como, la transferencia de calor en el dominio de flujo y la respuesta agua-roca, la organización del flujo en sistemas gobernados por la densidad, los típicos problemas de corrosión-sedimentación en las tuberías y sistemas receptores y de ductos en general, la propagación de la eventual carga contaminante (macroconstituyentes, metales y microelementos), el transporte de masa, momento y energía, con particular atención a los de transporte e intercambio de calor mencionados, los derivados de la eventual ausencia de capas confinantes que pudieran actuar como sellos en los acuíferos someros. Los algoritmos desarrollados, derivados o aplicados para solucionar este problema han sido validados en casos reales en dos condiciones extremas: a) para descargas submarinas en mar abierto y b) para acuíferos carbonatados libres y semilibres salinizados con o sin presencia cercana de interface tierra-océano y componente periódica de marea e intrusión marina, en un intento por armonizar políticas ambientales y políticas económicas que garanticen un desarrollo no antagónico entre ambos extremos de actividad social, cultural y económica. Bajo determinados esquemas de organización y de relación Academia-Gobierno-Comunidad-Consultor con los operadores de las compañías gasopetrolíferas se ha podido avanzar en la consideración y la implementación de este propósito. La incuestionable necesidad de garantizar el abastecimiento energético del país, pero balanceado con la sostenibilidad necesaria de otras áreas de valor económico, ambiental y social han primado en estas investigaciones.

HIDRODINÁMICA GEOQUÍMICA

Aspectos conceptuales

Los modelos predictivos de la hidrodinámica geoquímica de los sistemas hidrológicos se basan en las tasas de reacción de las reacciones que tienen lugar. Esas tasas se obtienen por dos vías: a) el estudio teórico y experimental de la cinética de todas las reacciones posibles en el sistema y b) mediante la aplicación del balance de masas a os datos químicos e

isotópicos obtenidos del sistema natural (Plummer y Back, 1980). Esta última es la forma adecuada para obtener información sobre las tasas de reacción. La diferencia fundamental para modelar las reacciones en sistemas naturales entre una y otra aproximación es que la primera emplea información termodinámica y cinética para identificar cuales reacciones pueden tener lugar en el sistema y, en la segunda, el cálculo del balance de masas (Appelo y Postma, 2005) para identificar aquellas reacciones que nunca pueden tener lugar en el sistema. Mediante el balance de masas se llega a obtener un modelo único de reacción que es consistente con los datos químicos e isotópicos observados. De ahí, siguiendo la metodología de Plummer y Back (1980) el modelo reactivo se combina con el tiempo total de reacción en el sistema.

En el caso de la inyección somera es necesario distinguir que, en esencia, ésta consiste en un sistema de recarga artificial en que aguas de composición macro semejante, pero más concentradas y, por ende, con mayor fuerza iónica, ingresan puntualmente y se mezclan con las aguas del sistema natural produciendo una alteración variable –en tiempo y espacio– sobre las aguas del sistema acuífero. El modo en que esta mezcla altera todas las propiedades físicas y químicas de las aguas receptoras es una de las condicionantes para definir la aceptabilidad ambiental de las aguas producidas en el acuífero. El tiempo y el espacio en que eventuales efectos negativos puedan reducirse en el sistema natural es un objetivo básico de esta tecnología.

Al inyectarse en pozos someros que alcanzan aguas naturales salinizadas, normalmente por encima de los 10000 mg/L, las restricciones que impone la relación de Debye-Hückel que (es una función de fuerza iónica mientras que la ecuación de Gibbs-Duhem es una función de la molalidad) dejan de ser importantes y la distribución de la fuerza iónica pasa a ser controlada por la ecuación de Pitzer (Amado, 2010; Kim y Frederick, 1988; Weber, 2000; Pitzer, 1979, 1987, 1991) a la que se adicionan una serie de términos *ad hoc* para tomar en cuenta las interacciones de corto alcance. La ecuación de Pitzer puede utilizarse con los cuatro parámetros para una concentración alta, o con dos y tres parámetros para concentración baja. La Teoría de Interacción Iónica de Pitzer, que es una profundización de la teoría de interacción específica propuesta por Bronsted, según el cual habrá interacción entre dos iones de signo opuesto y la interacción entre iones del mismo signo dependería exclusivamente de la carga eléctrica y la composición y estructura de los iones principales, los cuales son sintetizado en el nomograma de Miembros Geoquímicos Terminales de las aguas terrestres cubanas de Molerio-León (1992a; 2015, 2017, 2019, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e, 2021a, 2021b, 2021c).

El concepto de Miembro Terminal

La aplicación de métodos geoquímicos para la exploración hidrogeológica es conocida de antiguo. Su uso en la determinación de las componentes de flujo en los sistemas de agua subterránea cársicas es un recurso especialmente importante donde, muchas veces, las direcciones y velocidades cambian en distancias muy cortas debido a la distribución del campo de propiedades físicas, dominado por la anisotropía y la heterogeneidad del sistema. Los procesos de carsificación y espeleogénesis a lo largo de las líneas de flujo –primarias o subordinadas– llevan implícitos la disolución de la roca y la deposición, dentro o fuera del macizo, de tales productos de disolución en un intercambio sostenido de materia, momento y energía que tiene lugar en el interior del sistema y como resultado de su interacción con el medio exterior.

Controlado por condiciones de contorno específicas de cada sistema de flujo desde escalas microscópicas hasta la del sistema regional, el desarrollo de los sistemas cársicos epigenéticos, complejo por naturaleza, se rige por la hidrodinámica geoquímica del dominio de flujo. En otros términos, se trata de una combinación continua de procesos que no se detiene hasta que no cesa el movimiento del agua y el sistema se torna inerte, y en la que los factores que controlan la adquisición de la composición química de las aguas está condicionado por la distribución de los potenciales en el mismo dominio de flujo que, a su vez, está subordinado a la estructura del campo de velocidad del agua en el sistema. Este movimiento continuo –pero finito– es la causante principal de la anisotropía tridimensional progresiva que caracteriza al karst.

Sobre esta base, debido a que la carsificación y el cavernamiento en sistemas epigenéticos son consecuencia de la disolución de la roca por el agua en movimiento, el intercambio y la transferencia de masas que tiene lugar en los sistemas

cársicos (a cualquier escala del dominio) puede aplicarse en la aclaración de los patrones de flujo y la estructura el campo de flujo y viceversa.

Durante años, estos dos temas se trataron por separado, limitando el conocimiento de los procesos y reduciendo, por ende, la capacidad de actuar sobre ellos. A partir de la segunda mitad del siglo XX, básicamente con los trabajos de Freeze y Witherspoon (1966, 1967, 1968), Tóth (1962, 1963, 1970), Wallick y Tóth (1976), Schwartz, Muehlenbachs y Chorley (1981), Schwartz y Domenico (1973) y Hanshaw y Back (1985) el análisis se reorientó hacia un tratamiento unificado de la geoquímica y el movimiento del agua en los sistemas acuíferos que, en el karst, adquiere una relevancia extraordinaria (Fig. 1). El término aglutinador de hidrodinámica geoquímica introducido por William Back a principios de los años 80 del pasado siglo (William Back, *comunicación personal*, 1982) ha sintetizado la conceptualización del tratamiento del problema.

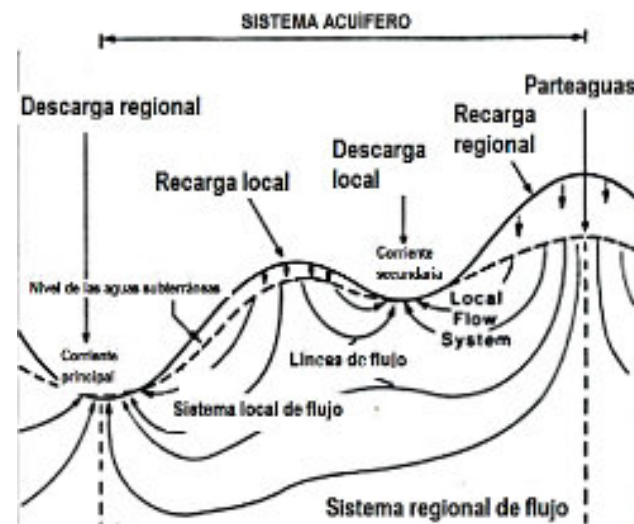


Fig. 1. Esquema general de la distribución espacial de los sistemas de flujo subterráneo (Tóth).

En situaciones complejas, de flujo multifásico que demandan soluciones ingenieras, este es un recurso de la mayor relevancia para distinguir la estructura del sistema acuífero y resolver los problemas de gestión adecuada del recurso hídrico. La solución de problemas de este tipo que involucraban la caracterización del acuífero cársico y la estructura del campo de flujo a lo largo de las líneas de flujo o en un sitio en particular del dominio temporo-espacial de flujo impuso al autor la necesidad de disponer de una herramienta confiable para caracterizar los límites geoquímicos de determinados tipos de aguas, definir las relaciones entre diferentes sistemas de flujo en el dominio regional (tanto en escala de flujo; es decir: muy locales, locales e intermedios así como en la composición química y su evolución en tales unidades).

Partiendo de los trabajos iniciales de Gutiérrez y Travieso (1978) de caracterización de la composición química de las aguas de lluvia de Cuba la serie fue extendida durante 15 años más hasta un corte en 1992 (Molerio, 1992) que incluyó un mayor número de estaciones e información isotópica (^{18}O , ^2H y ^3H) y otro más reciente, en 2010 (Molerio, 2012) en los que se procesaron varios miles de determinaciones de macroconstituyentes, metales y microelementos y algunas decenas de mediciones de los isótopos anteriores en aguas terrestres básicamente, provenientes de diferentes entornos hidrogeológicos (pero básicamente del karst de Cuba occidental y central y, con una data menor, en el caso de Cuba oriental) y ambientales que permitieron adelantar la identificación de patrones estables de la composición química de las aguas subterráneas y del ecotono aguas terrestres/aguas marinas (Fig. 2). La data procesada provino inicialmente de los archivos del actual Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la República de Cuba y ha sido ampliada sistemáticamente con datos del autor y sus colaboradores en los últimos 40 años. Estudios desarrollados por Schoeller (1941, 1948) constituyeron las bases del enfoque seguido por nosotros. Trabajos independientes han beneficiado estos resultados, como los de Rodríguez et al., (2004), Abelló et al. (1993), Álvarez et al., (1990), Arellano y Fagundo (1985),

Fagundo (1982, 1985, 1990a, 1990b, 1998, 2007; Fagundo et al., (2003, 2004); Yera y Molerio (1997), Yera y De Miguel, (2013), Yera, De Miguel y Fagundo (2014), entre otros.



Fig. 2. La naturaleza insular del archipiélago cubano y la escasa distancia entre las costas Norte y Sur de la isla principal (Cuba), obliga a considerar la intrusión marina como el factor principal de modificación de la composición química de las aguas subterráneas cársicas de Cuba y la principal amenaza al aprovechamiento de los recursos hidráulicos costeros. El diseño adecuado y la operación sistemática de redes de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas en el litoral es mandatorio (Foto del autor).

El análisis factorial ha mostrado la existencia de dos tipos fundamentales de aguas de lluvia, unas cloruradas y sulfatadas y otra bicarbonatada cálcica y magnésica. Las fuentes de Cl y SO_4 se deben a la presencia de aerosoles marinos y ácidos, de un lado, y de aerosoles alcalinos, por otro. El estudio de las variables (Molerio, 1992a) confirmó el ión cloruro como variable principal de discriminación (0,89 de correlación interclase entre la variable y el eje discriminante) en el primer grupo; en el segundo, los iones Ca y Mg (0,82 y 0,73, respectivamente, de coeficiente de correlación).

En cada grupo de aguaceros estandarizados, la menor distancia se observa entre aguaceros consecutivos o próximos, con un lag hasta de 30 días. La semejanza entre los iones discriminantes es notable para aguaceros separados por lags de un día. Al incrementarse el tiempo entre cada evento de lluvia, el criterio de agrupación viene definido por una combinación entre los factores discriminantes caracterizados por una mayor distancia; es decir, con una menor similitud.

En cuanto concierne a su efecto sobre la composición química de las aguas subterráneas, ello indica que el sistema acuífero recibe aguas de recarga neta -cuando ella se produce- de diferente composición, sobre todo, en elementos traza como por ejemplo el cloruro que, en dependencia de la longitud de mezcla se refleja con mayor o menor fidelidad en la concentración de las aguas subterráneas en el punto de muestreo. Por ello, adoptar valores medios de la concentración de ciertos elementos en el agua de lluvia para estimar la recarga natural en el acuífero es un método válido, solamente, cuando pueda discriminarse adecuadamente el tipo de lluvia y la variabilidad temporo-espacial del macroconstituyente que se tome como referencia. La concentración del ión cloruro, en la muestra de ejemplo, varía en el año de 0,05 a 0,32 mEq/l, es decir, casi cinco veces ($x_m = 0,18$; $\sigma = 0,067$; $CV = 0,38$). Para una lluvia media de 1300 mm, la recarga natural potencial puede variar hasta en un orden de magnitud.

Patrones de flujo

Los sistemas de flujo subterráneo se jerarquizan en tres escalas diferentes (Fig. 3) en correspondencia con los procesos de transporte e intercambio de masa, momento y energía; tratándose así, de sistemas regionales, intermedios y locales de flujo (Tóth, 1963), en los que el flujo se organiza siempre desde las zonas de recarga a las de descarga, en función del

gradiente hidráulico (es decir, la pendiente de la superficie piezométrica de las aguas subterráneas) y, desde las zonas de menor permeabilidad o conductividad hidráulica hacia las zonas en las que ésta es mayor.

En realidad, el proceso es más complejo y se debe a un conjunto de mecanismos hidrodinámicos y termodinámicos que condicionan el transporte de masas en el sistema, en particular del fluido y los solutos que se mueven con él. Los procesos básicos son los de transporte mecánico (advección), difusión, dispersión y retardo físico e hidrogeoquímico (Fig. 4), tan estrechamente vinculados entre sí, que resulta sumamente difícil discriminar con precisión el grado de influencia de los factores que se han identificado como reguladores del proceso de transporte de masa. Retardos adicionales que conducen a reacciones químicas en puntos singulares del acuífero pueden ser provocados por acumulación de aguas de escorrentía en condiciones de lluvias torrenciales que inundan dolinas (Fig. 5)

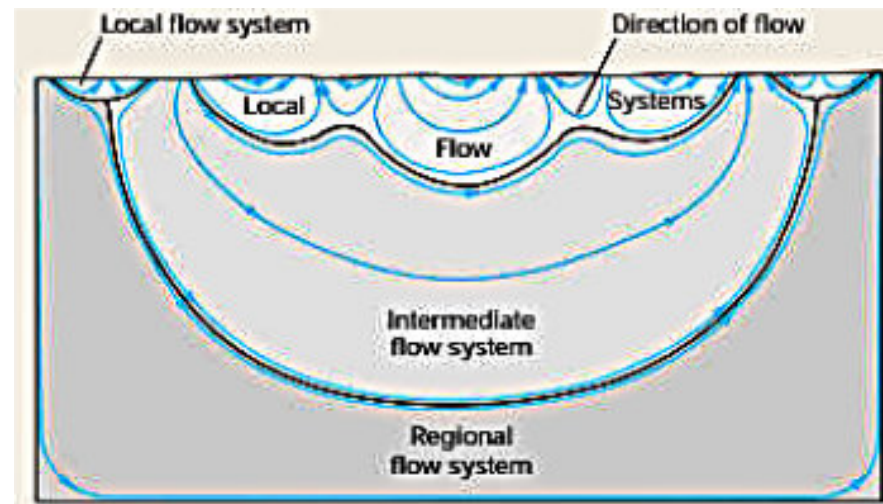


Fig. 3. Tipos jerárquicos de sistemas de flujo de acuerdo con Tóth (1963).

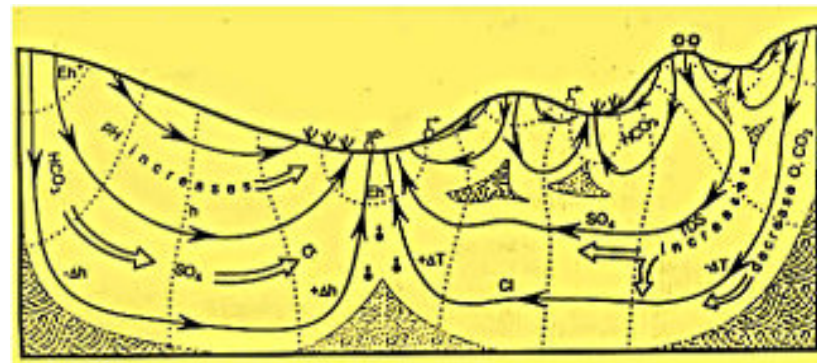


Fig. 4. Tipos de flujos geoquímicos de acuerdo con Tóth (1963).

Entre tales factores deben destacarse los siguientes:

- ☐ El flujo saturado que tiene lugar en el cuerpo del acuífero por debajo del nivel de las aguas subterráneas y hasta el lecho impermeable.
- ☐ El flujo no saturado que tiene lugar en la zona de aereación o zona no saturada, es decir, en el sector hidrodinámico de los acuíferos libres y que se extienden desde la superficie hasta el nivel de base de las aguas subterráneas.
- ☐ El flujo alternativamente saturado – no saturado, que ocurre en la zona de fluctuación estacional de las aguas subterráneas y ocasionalmente, cerca de la superficie del territorio bajo condiciones inhibición.
- ☐ El carácter permanente o impermanente del flujo.

- ☐ La homogeneidad relativa del medio acuífero y su anisotropía.
- ☐ La geometría del sistema acuífero.
- ☐ Los mecanismos de acreción e histéresis que se manifiestan, sobre todo, en el flujo alternativamente saturado – saturado.
- ☐ La velocidad y estabilidad de flujo subterráneo.
- ☐ La distribución de potenciales en el sistema de flujo que condicionan la dirección del movimiento y, en general del transporte de masas.
- ☐ Las fases presentes, puesto que no siempre el agua es el único fluido presente, toda vez que puede haber también aire, o líquidos de diferentes propiedades físicas y químicas en el acuífero.
- ☐ El intercambio de calor por razón del movimiento y rozamiento que este provoca.
- ☐ La transferencia de fluido entre los diferentes espacios (poros, grietas y cavernas) que constituyen el medio acuífero.

Sin embargo, aún pueden distinguirse sistemas muy locales de flujo que representan el movimiento en cortos trayectos pero que pueden resultar de marcada importancia para explicar los procesos de aportaciones y pérdidas de agua y del procesos de adquisición de la composición física, química, isotópica y bacteriológica de las aguas (Fig. 6) en los que la distribución del potencial de carga hidráulica (diferencia de altura o cota piezométrica) y del potencial de velocidad (distribución de la conductividad hidráulica) condicionan, a pequeña escala, un grupo de procesos particulares que no necesariamente reflejan el comportamiento regional del sistema pero que pueden complicar sobremanera el régimen y la calidad de las aguas subterráneas en ese sector de flujo. Por ello, equipotenciales y carga química no pueden separarse al momento de definir los procesos de organización del flujo subterráneo, su interacción con el flujo superficial y el intercambio geoquímico agua-roca en cada dominio particular de flujo.



Fig. 5. Dolina alternativamente seca e inundada por aguas de escorrentía superficial que responden a lluvias torrenciales locales (Foto del autor).

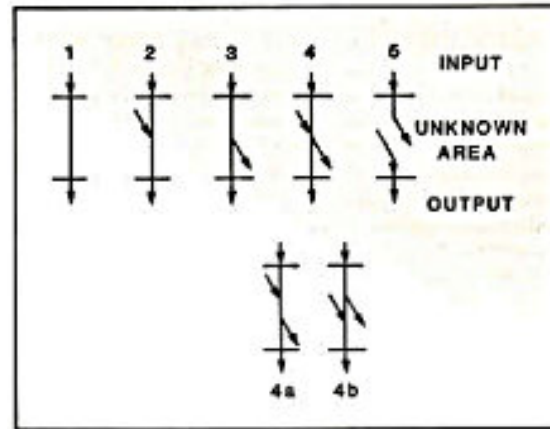


Fig. 6. Tipos de sistemas de flujo en el karst (según Brown y Wigley, 1969). 1) Entrada y salidas únicas; 2) Entrada lateral desconocida; 3) Salidas laterales desconocidas; 4) Entradas y salidas adicionales desconocidas; 5) Entrada y Salida desconocida.

El campo equipotencial permite construir las redes de flujo (Fig. 7) y de ahí definir, entre otros, los siguientes elementos base:

- Distribución de las zonas de recarga y descarga (términos fuente y sumidero en la ecuación general de flujo), y, con ello, la distribución de las fuentes de aporte (sus propiedades físicas y químicas), las líneas por donde discurre subterráneamente y los puntos donde eventualmente descarguen en superficie o se incorpore a otros circuitos de drenaje subterráneo; de este modo, tres momentos marcados por diferente dirección general de flujo se reconocen; a saber:
 - Movimiento vertical descendente (flujo vertical, desde la superficie hasta el nivel de las aguas subterráneas, que representa a las aguas de infiltración o de recarga)
 - Movimiento descendente horizontal (flujo lateral en la parte derecha de la figura) y que luego pasa a movimiento lateral horizontal
 - Movimiento vertical ascendente, en que las aguas se incorporan (descargan) en superficie. *En sistemas muy locales de flujo esta última rama puede no aparecer.*
- Velocidad de la corriente subterránea (teniendo la estructura y valores del campo de propiedades físicas, en términos de la conductividad hidráulica y la porosidad) y, con ello, el tiempo de residencia de las aguas y, por ello, la duración de los procesos de intercambio agua-roca

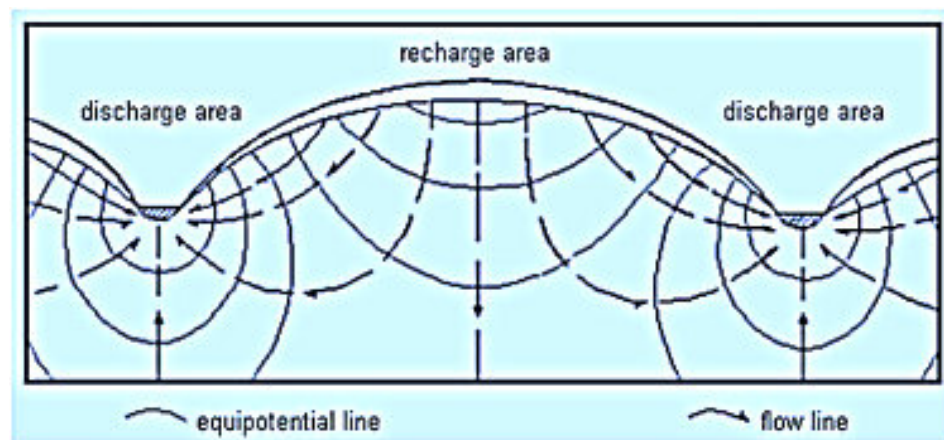
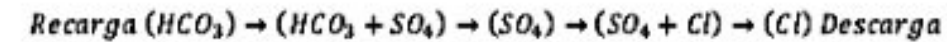


Fig. 7. Redes y líneas de corriente en sistemas de flujo (Tóth, 1963).

Procesos de adquisición de la composición química de las aguas

Los procesos de adquisición de la composición química en los sistemas regionales de flujo de agua subterránea están gobernados por los patrones marcados por la Secuencia de Chebotarev (1955), que indica los cambios en la composición química a partir de los iones dominantes desde la zona de recarga hasta la de descarga. Se expresa del modo siguiente, como una función de la dirección y la distancia del flujo subterráneo:



La Secuencia de Chebotarev, aún cuando se ha concebido para grandes cuencas sedimentarias, es ciencia establecida que se puede reconocer, prácticamente, en todo tipo de acuíferos. La combinación de los patrones de flujo y los procesos de transporte de masas a escala de sistema de flujo dan, como resultado, la presencia de tres zonas según Kamensky (1958):

- **Zona superior**, caracterizada por la actividad de las aguas meteóricas y su movimiento a través de la zona no saturada o de aereación, donde predomina el movimiento descendente de las aguas, dando por consiguiente aguas de muy baja mineralización, usualmente ricas en iones bicarbonatados, que Wallick y Tóth (1976) adscriben a los sistemas locales de flujo. Los desequilibrios iónicos, por mezcla de aguas, pueden provocar deposiciones de carbonatos de calcio o magnesio en los sitios donde diferentes aguas entren en contacto y el consiguiente incremento adicional de la capacidad disolvente de las aguas. Aquí el flujo se suele mover con mayor velocidad, tiene mayor potencial hidráulico y puede ser responsable de fenómenos locales de deslizamientos de tierra asociados al humedecimiento de los sedimentos friables superiores de cobertura o a las cortezas de intemperismo de las rocas.
- **Zona intermedia**, relacionada con los sistemas de flujo intermedio (Wallick y Tóth, 1976) y caracterizada por una velocidad más lenta de las aguas subterráneas, debido al reacomodo de las líneas de flujo, que ahora tienden a buscar una posición subhorizontal o aún horizontal. La mineralización aquí aumenta, y el sulfato irrumpe como el anión dominante. En esta zona es importante considerar la posibilidad de que ciertas puzolanas del cemento sean agredidas por aguas eventualmente sulfatadas que incrementen el efecto de ión común en la agresión al hormigón de ciertas obras de fábrica. La velocidad más baja de las aguas subterráneas hace que el tiempo de tránsito sea mayor y, por ende, la capacidad de la solución acuosa para saturarse e insaturarse periódicamente puede ser una fuente local y permanente de corrosión de las obras de fábrica con las que esté en contacto.
- **Zona inferior**, donde la migración de las especies químicas es mucho más lenta, debido a los bajos gradientes hidráulicos, el dominio del movimiento horizontal, el mayor tiempo de permanencia de las aguas en el sistema acuífero y el consiguiente aumento en la mineralización total, por razón del mayor tiempo de contacto agua-roca. Esta zona está típicamente gobernada por un dominio del ión Cloruro y que corresponderían a los sistemas regionales de flujo de Tóth (1963).

Los procesos de adquisición de la composición química están asociados al diferente tiempo de tránsito de las aguas en los sistemas de flujo y a las aportaciones de aguas de diferente composición, origen y tiempo de tránsito. El modo en que los efectos de mezcla se propagan depende adicionalmente de la variable longitud de mezcla, que es una función de la dispersividad del medio. La consecuencia que básicamente ello produce es que los impactos positivos y negativos de la mezcla de diferentes tipos de agua no necesariamente se producen en el punto donde ellas confluyen, sino que puede propagarse, y de hecho muchas veces ocurre así, aguas abajo del punto de convergencia.

Adicionalmente, la mezcla de aguas de diferente tipo, origen, y tiempo de tránsito controla la calidad de todo el sistema hídrico. Además de la temperatura y de la composición química de las aguas de lluvia como factores de gobierno de la hidrogeoquímica general, la dinámica geoquímica está regida por otros factores de no menor importancia como aquellos de control geológico: composición litológica, cambios faciales horizontales y verticales, espesor de las rocas acuíferas, estructura y conexión física de los sistemas de agrietamiento, disposición estructural de las capas, cobertura de suelo, entre otros.

Conviene traer a colación el enfoque de facies hidroquímica, introducido en su momento por Back (1960, 1966) para distinguirla distribución regional del flujo en tanto refleja los efectos de los procesos químicos que tienen lugar entre el

agua en movimiento y los minerales constituyentes de las rocas, habida cuenta que el flujo de agua subterránea modifica las facies y controla su distribución.

A escala muy local de flujo, el concepto fue aplicado originalmente por Molerio en 1999 (en un reporte inédito) para identificar los tipos de agua en el acuífero que subyace la Planta de Gas de Varadero. El criterio, mejorado, fue sustituido a partir de la identificación de los miembros terminales de las aguas subterráneas de Cuba y la agrupación por patrones geoquímicos basados en las capacidades de representación gráfica e interpretación que brinda la distribución semilogarítmica de los macroconstituyentes en el Gráfico de Schoeller (1941, 1948, 1956, 1959, 1962) modificado por Molerio (1992, 2012). La aplicación y comprobación sistemática de este método en estudios llevados a cabo por el autor y sus colegas y colaboradores en trabajos de investigación aplicada ha contribuido a mejorar los indicadores de referencia.

Concentraciones de base

Todas las aguas subterráneas en acuíferos carbonatados cubanos muestran patrones geoquímicos semejantes y las diferencias básicas se deben a la distancia a la costa y el tiempo de residencia de las aguas (tiempo de contacto agua-roca) lo que incluye considerar el potencial de velocidad del campo de flujo subterráneo y el grado de saturación con respecto a los iones básicos (Ca, Mg, Na). No obstante, se pueden encontrar variaciones locales debidas a la composición química de las rocas, flujos cruzados, distintos tiempos de tránsito –y por consiguiente de contacto agua-roca- y procesos locales de intercambio de flujo. Las diferencias básicas se deben a:

- La distancia a la costa.
- El tiempo de residencia de las aguas (tiempo de contacto agua-roca) lo que incluye:
- El potencial de velocidad
- El grado de saturación con respecto a los iones básicos (Ca, Mg, Na)
- Todas las aguas terrestres de Cuba se encuentran en los límites establecidos en los Miembros Geoquímicos Terminales descritos por Molerio (1992).

La fuente principal de aporte de las aguas subterráneas en Cuba son las lluvias y, por tratarse de un territorio insular, el elemento traza distintivo es la concentración de Cloruros (Cl). La concentración base de cloruros en el agua de lluvias (Molerio y Yanes, 2005) se determina mediante mediciones directas, gráficamente (Fig. 8) o resolviendo la Ecuación de Schoeller-Molerio (en mg/L) de nivel de fondo en función de la distancia a la costa x (en km):

$$Cl = 16 \exp(-0,0462x) + 5 \exp(-0,0015x)$$

Respecto a la mezcla de aguas en el caso de los yacimientos gasopetrolíferos carbonatados se concluye que:

- Las aguas de diferentes fuentes/horizontes acuíferos pueden mezclarse si exhiben compatibilidad geoquímica.
- La compatibilidad Geoquímica es una función de las fuentes y la distribución y la concentración de los macro constituyentes (HCO₃, SO₄, Cl, Ca, Mg, Na, K).
- Las aguas producidas de los yacimientos gasopetrolíferos carbonatados muestran patrones semejantes a los de las aguas subterráneas salinizadas de los acuíferos cársicos litorales someros.
- Las diferencias fundamentales en microelementos seleccionados se deben al diferente grado de saturación y migración acuosa.
- La saturación diferencial se resuelve mediante el Modelo de Pitzer de manera mucho más precisa que con el modelo clásico de Debye–Huckel.

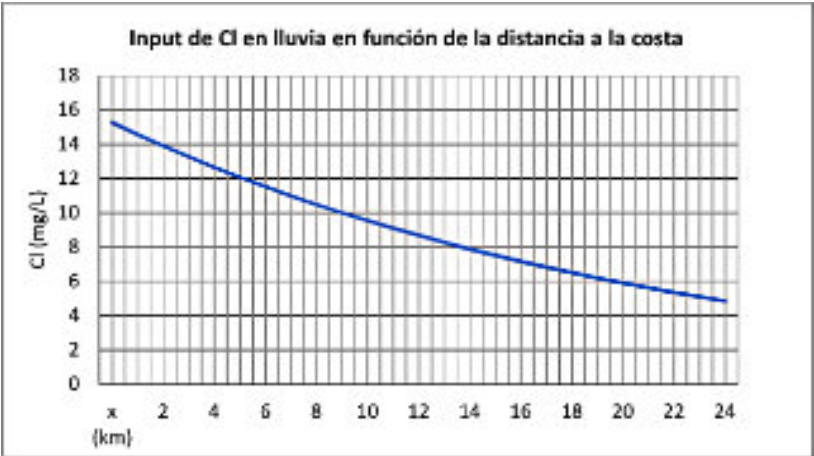


Fig. 8. Distribución del input de Cloruros (mg/L) en el agua de lluvias en función de la distancia a la costa (medida en km, tomando como referencia la costa norte de la provincia de Matanzas) según a ecuación de Schoeller modificada por Molerio (1992, 2012).

Sin embargo, el balance general muestra que se trata de aguas dulces, de muy baja mineralización. Como promedio, se trata de aguas del tipo Cl-HCO₃-Na-Ca. Los valores mínimos y máximos y una relación Cl/HCO₃ indicadora de una fuente de cloruros en el agua de lluvia. Una fuente adicional de aerosoles de tipo alcalino y ácidos ya fue descrita por Gutiérrez y Travieso (1978) según se deriva de la relación HCO₃/(Ca-SO₄).

Miembros terminales y de transición. Representación gráfica

Estos patrones representan (Fig. 9) los valores promedio estandarizados de los macroconstituyentes (Tabla 1) por tipo genético terminal de aguas, por lo que se reconocen –desde el origen hasta la zona de descarga- los siguientes tipos:

1. Aguas de lluvia (Miembro terminal de origen; zona de recarga)
2. Aguas dulces (con dos límites: superior e inferior, englobando los valores medios máximos y medios mínimos)
3. Aguas de mezcla (refiriéndose preferentemente a aguas del ecotono costero afectadas por intrusión marina)
4. Aguas de capa (de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados –salmueras de petróleo- que pueden encontrarse con composiciones muy semejantes o por encima de las aguas de mar, e incluso como aguas connatas)
5. Aguas de mar (Miembro terminal final; zona de descarga)

Tabla 1.. Concentración estandarizada de macroconstituyentes (mEq/L) en los miembros terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba (TDS, Sólidos Totales Disueltos en mEq/L). Estos son los valores índice para construir el Nomograma de Schoeller-Molerio conservando el orden propuesto por Schoeller (ver bibliografía) y en los que se destaca el hecho de la influencia de los aerosoles marinos en la composición original de las aguas de lluvia del país.

Miembros terminales y de transición	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO ₄	HCO ₃	TDS	Posición en el sistema de flujo
Lluvia	0,048	0,026	0,078	0,077	0,050	0,065	0,048	Zona de recarga
Aguas superficiales	1,09	0,13	0,24	0,29	0,14	1,17	3,07	Zona de tránsito
Dulces Límite Inferior	1,23	0,66	2,03	2,95	0,57	5,08	12,52	
Dulces Límite Superior	2,46	1,62	13,47	29,03	9,42	7,36	63,36	
Aguas de mezcla	2,72	3,25	42,39	84,02	10,69	2,28	145,34	Zona de descarga
Agua de Mar	22,41	113,93	484,17	635,57	102,50	2,92	1361,50	
Aguas de Capa	1,17	8,63	934,46	902,43	38,66	129,97	2015,32	Fenómeno local

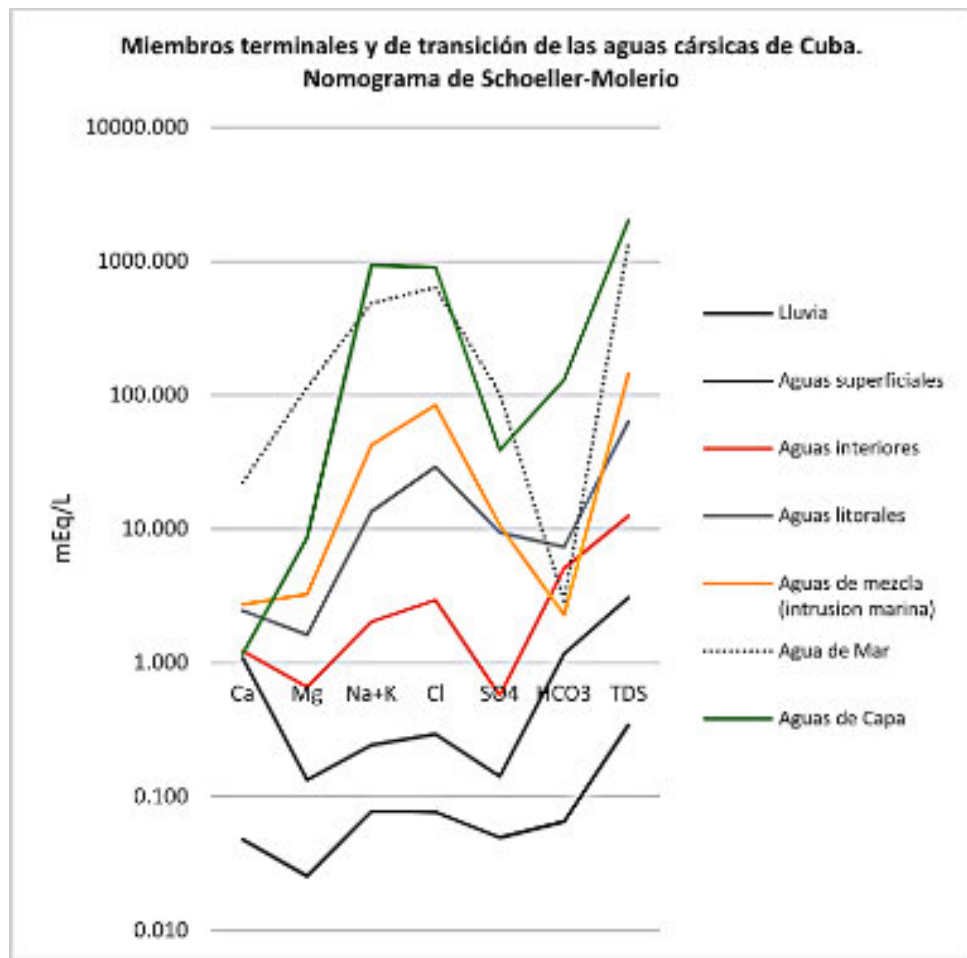


Fig. 9. Nomograma semilogarítmico de Schoeller (modificado por el autor) de los miembros terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba.

Procedimiento e interpretación del Nomograma de Schoeller

El nomograma (Catalán, 1969) se construye graficando las concentraciones de macroconstituyentes, expresadas en mEq/L en las coordenadas semilogarítmicas (eje y), colocando los macros en el eje x, en el orden de izquierda a derecha para los tenores de Ca, Mg, Na+K, Cl, SO₄, HCO₃ y TDS.

La pertenencia a cualesquiera de las categorías y tipos de miembros terminadles o de transición se identifica graficando adicionalmente los valores estandarizados (Tabla 2). En tanto la Tabla 3 resume las concentraciones estandarizadas desde la zona de recarga a la zona de descarga. La Tabla 4, por su parte, sintetiza las principales características y significado de los aniones principales. Los valores absolutos de Ca, Mg y Na dependen de la concentración de los aniones y del intercambio de base y, en base a ello, deben ser interpretados caso a caso. Debido a que los resultados de laboratorio se expresan comúnmente en mg/L, es necesario convertir las concentraciones en mEq/L, multiplicando por los factores de la Tabla 4.

Tabla 2. Concentración estandarizada de macroconstituyentes (mEq/L) en la Secuencia de Chebotarev referidas a los miembros terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba (la secuencia se sigue en diagonal desde la zona de recarga a la de descarga enlazando los patrones tipo de la secuencia).

Miembros terminales y de transición	HCO ₃	HCO ₃ +SO ₄	SO ₄	SO ₄ +Cl	Cl
Lluvia	0,065	0,115	0,050	0,127	0,077
Aguas superficiales	1,167	1,309	0,142	0,435	0,293
Dulces Límite Inferior	5,080	5,650	0,570	3,520	2,950
Dulces Límite Superior	7,360	16,780	9,420	38,450	29,030
Aguas de mezcla	2,278	12,964	10,686	94,701	84,015
Agua de Mar	2,917	105,422	102,504	738,076	635,571
Aguas de Capa	129,973	168,633	38,660	941,090	902,430

Tabla 3. Significado hidrogeológico y geoquímico de los aniones principales.

Anión	Significado hidrogeoquímico
HCO ₃	Es el macroconstituyente más importante, el indicador básico de la circulación por los terrenos carbonatados del karst y presenta valores muy constantes y su concentración es un indicador indirecto de la presión parcial de CO ₂ . Disminuye cuando el agua entra en contacto con el aire con una pCO ₂ menor que la del suelo o la del aire intersticial. Las concentraciones pueden ser anormalmente altas en presencia de aguas provenientes de terrenos volcánicos o metamórficos o en aguas de yacimientos gasopetrolíferos (con abundante materia orgánica que tiende siempre a oxidarse). Los valores absolutos deben ser interpretados cuidadosamente considerando el producto de solubilidad [HCO ₃][Ca] y una adición de Ca debida a intercambio de base o por disolución del yeso, que tiene el efecto de disminuir la concentración de HCO ₃ cuando se alcanza el valor del producto.
SO ₄	La disolución de los sulfatos y y del yeso en particular produce concentraciones elevadísimas de SO ₄ , por lo que aquí también debe ser considerado el producto de solubilidad [SO ₄][Ca]. Por otro lado, valores muy bajos de SO ₄ pueden estar asociados a altos valores de Ca y no necesariamente a reducción de sulfatos por intercambio de bases.
Cl	El ión cloruro es un trazador natural excelente debido a que es sumamente conservativo e indica con seguridad el tiempo de permanencia de las aguas en el sistema acuífero y, con ello el tiempo de contacto agua roca, la longitud de la trayectoria y la presencia de fenómenos adicionales de intrusión marina e infiltración de aerosoles (Fig. 10). Es de una utilidad extraordinaria para el cálculo de la infiltración efectiva de los acuíferos.

Tabla 4. Factores de conversión de mg/L a mEq/L.

Ión	Factor	Ión	Factor
HCO ₃	0,01639	Al	0,1112
CO ₃	0,03333	Ba	0,01456
SO ₄	0,02083	BO ₂	0,02336
Cl	0,02821	Br	0,051251
Ca	0,04990	F	0,055264
Mg	0,08226	Fe	0,03581
Na	0,04350	Fe	0,05372
K	0,02557	I	0,00788
NH ₄	0,05544	Li	0,1441
NO ₂	0,2174	Mn	0,0364
NO ₃	0,01613	Mn	0,07281
HPO ₄	0,02034	Sr	0,02283
H ₂ PO ₄	0,010310	PO ₄	0,03159

La interpretación del nomograma sigue las siguientes reglas básicas:

1. Las aguas provenientes de rocas de la misma naturaleza, con independencia de sus edades o propiedades del almacenamiento exhiben características comunes. Así, en aguas de acuíferos carbonatados debe esperarse que $r\text{CO}_3$, $r\text{HCO}_3 > r\text{SO}_4$ o $r\text{Cl}$ y $r\text{Ca} > r\text{Mg}$ o $r\text{Na}$; aguas provenientes de areniscas y arenas o de rocas cristalinas deben exhibir bajos valores de Sólidos Disueltos Totales (TDS) y CO_3 por debajo de lo normal; aguas en contacto con arcillas y margas muestran alto TDS y una proporción alta de $r\text{Cl}$ y $r\text{Na}$, de manera que $r\text{Cl}$ y $r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3$ así como $r\text{Na} > r\text{Mg}$ o $r\text{Ca}$. Agua proveniente de unidades yesíferas muestran altos valores de TDS y $r\text{SO}_4 > r\text{CO}_3$.
2. Aguas provenientes de rocas de la misma naturaleza petrográfica no tienen necesariamente que exhibir la misma composición química con idénticas proporciones de los macroconstituyentes en todos los casos. Tener en cuenta que las diferencias químicas son el resultado de desiguales propiedades de calidad en la recarga, en el clima y en la longitud y tiempo de tránsito en el sistema.
3. Aguas provenientes de rocas de la misma naturaleza petrográfica, edad y en la misma región tienden a parecerse, presentando muchas más características comunes que aquellas que provienen de rocas petrográficamente similares, pero de diferente edad y pertenecientes a diferentes sistemas acuíferos. Aguas de sistemas locales en una misma región y complejo formacional tienden a ser más diferentes entre sí que aquellas que se evalúan a escalas diferentes. Esta diferenciación permite aproximarse a la identificación de sistemas locales de flujo.
4. Pero aguas de dos cuerpos separados en el mismo horizonte acuífero pueden diferir en su composición química incluso cuando están muy próximas. Esto es común en el karst donde circuitos de drenaje casi contiguos pueden responder a patrones de circulación diferentes en desarrollo y evolución. Como corolario de lo anterior, a medida que se aproxima a la caracterización de sistemas regionales o subregionales (intermedios), la semejanza se hace mayor. Los puntos y naturaleza de la recarga pueden ser diferentes o las facies pueden cambiar bruscamente lateral o en sentido vertical, cambiando los patrones geoquímicos. El modo en que se organiza el escurrimiento subterráneo y la forma en que se expresa, difuso o concentrado o incluso mixto varía las velocidades de circulación, el tiempo de tránsito y, en consecuencia, el tiempo de contacto agua-roca, modifica los procesos de insaturación-saturación-sobresaturación y altera las relaciones iónicas. Del mismo modo, deben esperarse modificaciones importantes en dependencia de las relaciones hidráulicas, sea el flujo libre, retardado o incluso confinado.
5. Aguas del mismo sistema, en la misma formación geológica con similar composición petrográfica y edad manifiestan características químicas persistentes y semejantes que contrastan fuertemente de aquellas que provengan de otros sistemas separados geológica o hidráulicamente aun cuando provengan de rocas idénticas, de la misma edad e incluso, del mismo horizonte.
6. Cuando se dispone de historiales en los mismos puntos, una excelente forma de descubrir variaciones en la calidad, origen de la circulación, fuentes de aporte y procesos geoquímicos internos, se identifica gráficamente cuando las líneas que enlazan la composición química dejan de correr paralelas en el gráfico y se cruzan. Este es un indicativo de variaciones en la hidrodinámica geoquímica cuyas causas –naturales o inducidas artificialmente– merecen una atención especial.



Fig. 10. Los aerosoles marinos se transportan, a veces hasta más de 50 km tierra adentro sobre todo cuando se producen los frentes fríos, flujo de aire frío proveniente del continente, al Norte del país (Foto del autor).

Valores relativos y relaciones iónicas

En adición a las interpretaciones anteriores, la evaluación de las relaciones iónicas básicas (Tabla 5) aporta información importante a escalas desde los procesos locales hasta regionales y contribuye a precisar tanto la zona del acuífero por la que circulan las aguas, como los cambios en los procesos de adquisición de la composición química de las aguas. La Fig. 11 muestra la evolución de las relaciones desde la zona de recarga a la de descarga. La Tabla 6 resume el significado de las más importantes relaciones iónicas.

Tabla 5. Relaciones iónicas básicas estandarizadas para los miembros terminales y de transición (en mEq/L).

Miembros terminales y de transición	$r\text{Mg}/r\text{Ca}$	$r\text{SO}_4/r\text{Cl}$	$(r\text{Cl}-r\text{Na})/r\text{Cl}$	$r\text{Na}/r\text{Ca}$	$r\text{Na}/r\text{Mg}$	$r\text{Na}/(r\text{Ca}+r\text{Mg})$	$r\text{SO}_4 \cdot r\text{Ca}$	$r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$
Lluvia	0,53	0,64	-0,01	1,63	3,05	1,06	0,002	1,18
Aguas superficiales	0,12	0,48	0,17	0,22	1,82	0,20	0,154	0,25
Dulces Límite Inferior	0,54	0,19	0,31	1,65	3,08	1,07	0,701	0,58
Dulces Límite Superior	0,66	0,32	0,54	5,48	8,31	3,30	23,17	3,94
Aguas de mezcla	1,19	0,13	0,50	15,58	13,06	7,10	29,074	36,87
Agua de Mar	5,09	0,16	0,24	21,61	4,25	3,55	2296,6	217,85
Aguas de Capa	7,38	0,04	-0,04	798,68	108,2	95,35	45,23	6,94

Tabla 6. Significado hidrogeoquímico de los valores relativos de las concentraciones y las relaciones iónicas fundamentales.

Relación	Significado hidrogeológico
$r\text{SO}_4/r\text{Cl}$	Es un valor característico de un sistema acuífero, pero es también un sólido indicador de intrusión marina en tanto SO_4 tiende a ser constante en los sistemas uniformes y homogéneos. La relación varía notablemente con ligeros incrementos en los valores de SO_4 o de Cl , pero cuando se excede el producto de solubilidad $r\text{SO}_4 \cdot r\text{Ca}$ la relación disminuye. La relación disminuye hacia la zona de descarga (en tanto aumenta la relación Mg/Ca).
$r\text{Mg}/r\text{Ca}$	Caracteriza los sistemas acuíferos y, en los cársticos es especialmente importante en tanto denota los aportes y pérdidas relativos de Ca y Mg , tanto por aportes, incluidos los procesos de dolomitización como de pérdidas por dedolomitización. En las aguas continentales varía entre 0,2 y 1,8. El valor de la relación es bajo y tiende a 1 en presencia de dolomitas. En presencia de aguas de mar oscila alrededor de 5 y se despegas de 1 en aguas de mezcla (intrusionadas). Para las aguas de capa los valores son altos, 7 o superiores. Es aconsejable interpretarla de manera conjunta con las relaciones $r\text{Na}/r\text{Ca}$, $r\text{Na}/(r\text{Ca}+r\text{Mg})$ y $r\text{Na}/r\text{Mg}$. Tiende a disminuir hacia la zona de descarga.
$r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$	Es una relación muy sólida en el tratamiento de acuíferos cársticos, pero debe ser evaluada cuidadosamente pues presenta oscilaciones debidas a lo conservativo del ión Cl y al aporte variable de HCO_3 en sistemas cársticos carbonatados. En presencia de intrusión marina, los valores aumentan bruscamente debido al predominio de Cl en la mezcla, en detrimento del aporte de HCO_3 de las rocas carbonatadas. En Cuba es muy alto relativamente en las aguas de lluvia por la influencia de los aerosoles marinos, pero en la fase terrestre los valores disminuyen casi a la mitad y solamente superan la unidad en las partes bajas de sistemas regionales de flujo.
$r\text{Na}/r\text{Ca}$	Resulta un indicador del material que constituye el acuífero, pero es más conveniente para evaluar los cambios de base en el sistema. Los valores relativamente altos que presentan en las aguas de lluvia cubanas se deben a la presencia de aerosoles marinos en las precipitaciones y en las capas bajas de la atmósfera.

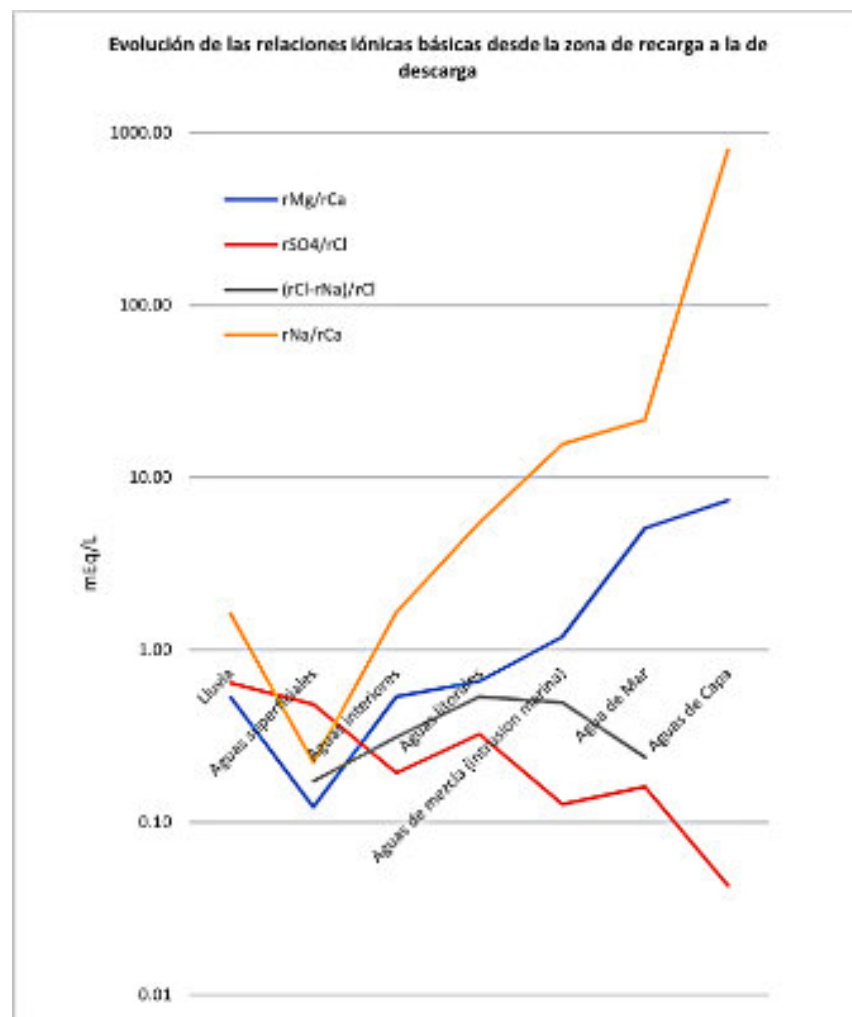


Fig. 11. Evolución genérica de las relaciones iónicas principales a lo largo de una línea de flujo desde la zona de recarga a la de descarga.

Composición isotópica del agua de lluvia

En rigor, el proceso de adquisición de la composición química de las aguas subterráneas no puede conocerse a fondo sin caracterizar las aguas que ingresan en el sistema por la vía de las precipitaciones. Otro tanto ocurre con la composición isotópica estable, habida cuenta que –en este caso– pueden también obtenerse evidencias de los procesos de evaporación, condensación y tiempo de tránsito de tales aguas en el epikarst y en la zona no saturada; esto es, antes de incorporarse al acuífero.

La combinación de ambos patrones permite identificar la zonalidad vertical, las facies hidroquímicas, los patrones de flujo subterráneo, la evaluación de variables del balance hídrico –evaporación, evapotranspiración, infiltración eficaz, la cinética del proceso de carsificación, la regionalización de los sistemas acuíferos, la contaminación atmosférica y de las aguas y, además, determinar cuantitativamente algunos parámetros del fraccionamiento isotópico; en particular, la temperatura de formación de las aguas y de los depósitos a ellas asociados en el karst, como espeleotemas y cortezas de sínter.

Estos estudios, realizados en distintos períodos fueron patrocinados por el Organismo Internacional de Energía Atómica y el GSF Instituto de Hidrología de Múnich, R.F.A., donde se hicieron las determinaciones de laboratorio y se prepararon algunos de los modelos matemáticos. El soporte local fue brindado por el desaparecido Centro de Hidrología y Calidad de

las Aguas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Sus resultados generalizados se comparan con los datos base de las estaciones de la red IAEA en el Golfo de México y el Caribe.

Se habilitaron cinco estaciones de monitoreo para el muestreo integral de las aguas de lluvia, en diferentes entornos geológicos, geomorfológico e hidrológicos y con altitudes y distancias a la costa variables (Figs. 12-14). Las estaciones habilitadas, todas en ambiente cársico fueron establecidas en instalaciones hidrometeorológicas de referencia pertenecientes al sistema del INRH; a saber, Ciro Redondo (CR), Santa Ana (SA), El Salto (ES), Finca Ramírez (FR), Casiguas (CS) y El Mudo (EM). Comparaciones y referencias fueron realizadas con las estaciones base de Santiago de las Vegas (SV) y Colón (CL). Algunos resultados de estos estudios fueron adelantados en su momento (Arellano et al., 1989; Arellano, Fagundo y Silar, 1987; González et al., 1989; González y Feitó, 1988; Molerio et al., 1990, 1991, 2000, 2002a, 2002b).



Fig. 12. Distribución geográfica de las estaciones habilitadas.



Fig. 13. Karst de las llanuras de Colón (Estación C; Foto del autor).



Fig. 14. Karst en los alrededores de la Estación CR (Foto del autor).

Tipos y distribución de las lluvias en Cuba

La media normalizada de 42 años de la lluvia del país es de 1375 mm, distinguiéndose dos estaciones, la lluviosa, de mayo a octubre, en que -como promedio- se precipitan 1059 mm, y la menos lluviosa, en que se registran unos 316 mm, y se extiende de noviembre a abril del año siguiente. La distribución de la lluvia en el país es bastante irregular. Ello se debe a: 1/ la diferente influencia de los procesos atmosféricos condicionados por el sistema general de circulación del aire; 2/ el relieve del país, que presenta grandes contrastes topográficos e influye sobre la formación e intensidad de las precipitaciones y 3/ el calentamiento irregular de la superficie de la tierra firme y de las aguas costeras.

En el invierno -período menos lluvioso-, sobre el Occidente y Centro del país se extienden con frecuencia masas de aire frío que vienen del continente al Norte, como consecuencia del desplazamiento hacia el Atlántico Central del Anticiclón de las Bermudas. Durante el verano, la influencia de las altas presiones del Atlántico Norte es menor; aquí es mayor el efecto de las bajas presiones ecuatoriales que causan intensos aguaceros y tormentas debido a las incursiones de aire húmedo. A principios del verano son especialmente importantes las lluvias convectivas, cuyos máximos se alcanzan en mayo y junio. Otra componente importante que explica la irregularidad de las precipitaciones, viene dada por los huracanes lluviosos y ciclones tropicales, fenómenos persistentes, pero no periódicos, que no se presentan todos los años.

En las zonas montañosas y de alturas menores, las precipitaciones se redistribuyen de manera que los gradientes pluviométricos coinciden con los valores absolutos que se registran en las vertientes de barlovento. En las costas, bahías y valles fluviales las precipitaciones disminuyen. De este modo se reconocen cuatro tipos fundamentales de lluvia en el territorio nacional: 1/ convectivas, 2/ frontales, 3/ orográficas y 4/ huracanadas. La intensidad máxima de los aguaceros está en relación inversa con su duración. Excluyendo las lluvias huracanadas, la intensidad máxima de las lluvias torrenciales es de 5 mm/1 min; aguaceros con intensidades de 3-4 mm/min tienen una duración de 5-10 min; de 2,4-3 mm/min, 20 minutos y, entre 1,32 y 1,85 mm/min, una hora. El número de días con lluvia (> 1 mm) aumenta de la costa hacia el interior, incluyendo las zonas montañosas y llega a alcanzar 160 días en el año.

Composición isotópica estable de la lluvia

En cuanto concierne a la composición isotópica estable, como regla, los valores de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y d (exceso de Deuterio) se encuentran más empobrecidos en verano que en invierno con independencia de la altitud y la distancia a la costa de las estaciones. En el mes de Julio se observa un enriquecimiento relativo en isótopos estables motivado por un descenso,

también relativo, de la lámina de lluvia del período húmedo. Ello coincide, además, con un incremento en la temperatura media del aire (máximos absolutos del valor medio) que acelera los procesos de fraccionamiento isotópico. Con el descenso de la temperatura, la lámina de lluvia, y la evapotranspiración en invierno, se incrementa la concentración en isótopos, alcanzando los valores máximos de $\delta^{18}\text{O}$ entre Febrero y Marzo y los de Deuterio en Enero, para el caso de estaciones situadas a mayor distancia de la costa y con rasgos de continentalidad en las precipitaciones pero, como regla, los máximos coinciden en Febrero y Marzo, al igual que para el $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 15).

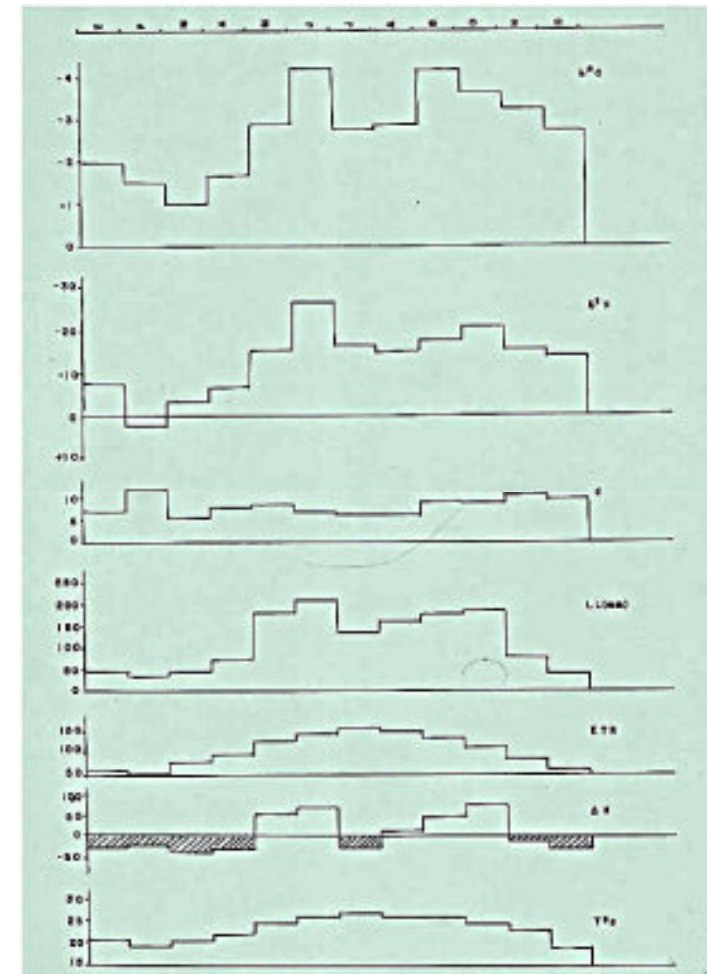


Fig. 15. Distribución interanual promedio de las variables hidrometeorológicas y de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y d.

La Fig. 16 muestra las relaciones lineales encontradas para la serie media histórica (10 años) entre la composición isotópica estable, las láminas de lluvia mensuales (LL) y la temperatura media del aire ($T^{\circ}\text{C}$) con $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y d. Las Tablas 7 y 8 muestran la estadística sumaria del registro de cinco (5) estaciones de muestreo del agua de lluvia del Occidente de Cuba.

De la Estación colón se procesaron 126 aguaceros convectivos (de verano, meses de Mayo a Octubre) individuales para conocer la composición química por tipo de aguacero. La Tabla 9 muestra los estadígrafos básicos de la serie procesada. La estación está situada de manera equidistante de las costas Norte y Sur de Cuba Occidental y, climatológicamente presenta rasgos de continentalidad. Las aguas de estos aguaceros, como promedio son del tipo $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$ e idéntica composición presentan los valores máximos. Los mínimos corresponden a aguas de tipo $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca-Mg}$. El alto CV de SO_4 sugiere la presencia de una fuente variable de acidez¹.

¹ En todos los casos se asumió una reacción de neutralización completa con exceso de Ca sobre SO_4 , que resultó el caso más común, aunque en algunos aguaceros se dio el caso de que $\text{rSO}_4 > \text{rCa}$.

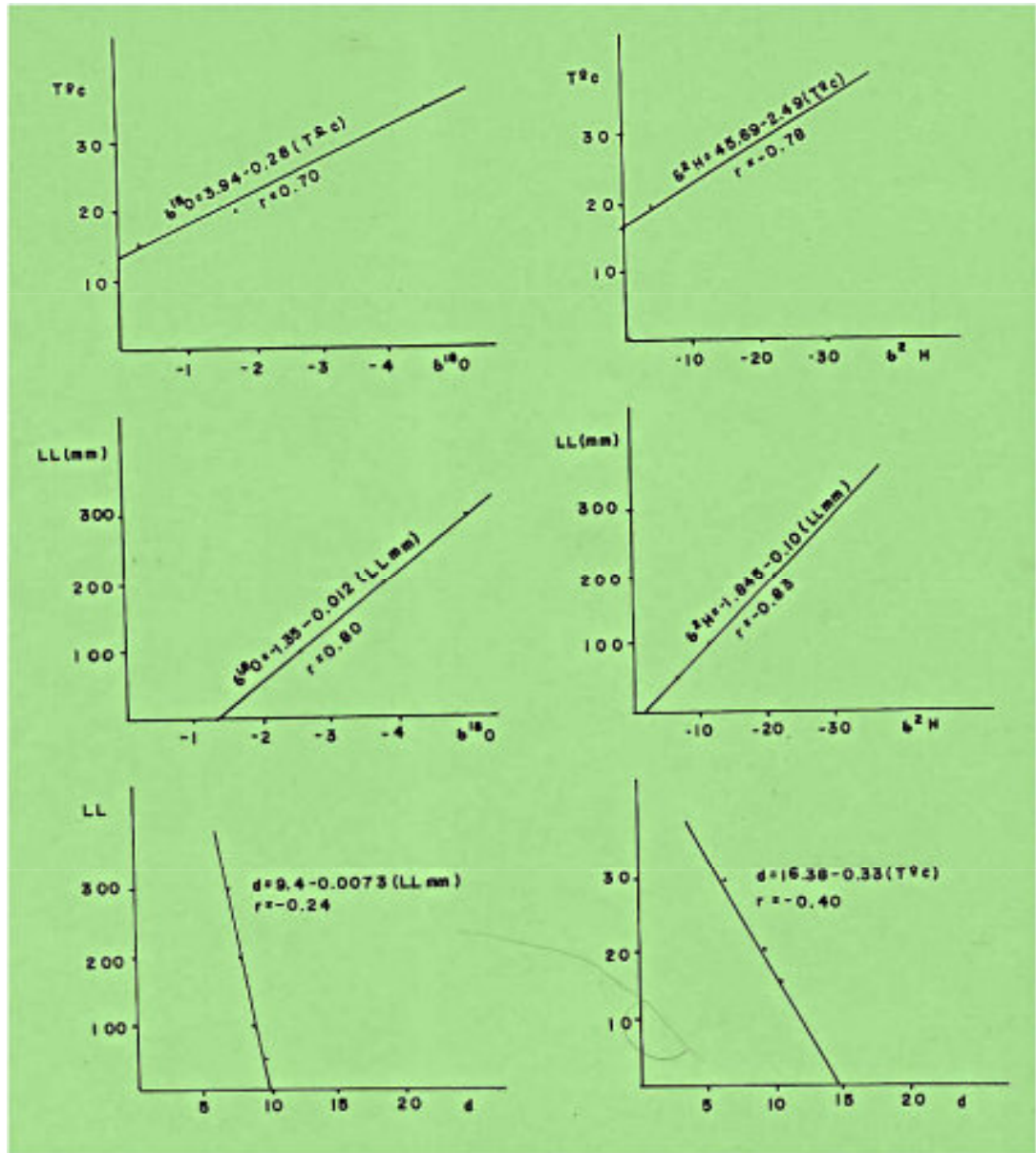


Fig. 16. Relaciones lineales para la serie media histórica (10 años) entre la composición isotópica estable, las láminas de lluvia mensuales (LL) y la temperatura media del aire (T°C) con $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y d.

Tabla 7. Estadística sumaria respectiva de la composición química estable de las aguas de lluvia en cinco estaciones de muestreo del Occidente de Cuba expresadas en ‰ (x_m , valores medios; x_w , valores medios ponderados; DS, desviación estándar; CV, coeficiente de variación).

Estadígrafo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d
n	149	149	149
δx_m	-2,69	-11,16	10,76
δx_w	-2,64	-14,48	10,14
DS	0,92	7,35	3,12
CV	-0,34	-0,66	0,31

Tabla 8. Distribución promedio interanual de la composición isotópica de las aguas de lluvia de Cuba (n, número de eventos o casos), lámina de lluvia (LL), evapotranspiración real corregida (ETR), déficit de humedad (H) y temperatura media del aire (T), (x_m , media aritmética; x_w , media ponderada, DS, desviación estándar; CV, coeficiente de variación).

Mes	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d	LL	T	ETR	H
E	-2,0	-7,5	7,0	44	20,5	61,4	-17,4
F	-1,5	2,8	12,5	36	19,8	52,6	-16,6
M	-1,0	-3,2	5,6	45	21,6	77,5	-32,5
A	-1,7	-6,5	8,5	72	23,1	95,9	-23,9
M	-2,9	-15,5	8,75	182	24,9	128,4	+53,6
J	-4,25	-27,0	7,0	213	26,2	146,2	+66,8
J	-2,8	-17,5	6,5	137	26,8	160,4	-23,4
A	-2,9	-16,5	6,5	158	26,4	149,5	+ 8,5
S	-4,2	-18,0	9,4	181	26,3	135,9	+45,1
O	-3,7	-21,3	9,5	188	24,9	113,6	+74,4
N	-3,3	-16,0	11,0	79	23,0	83,9	- 4,9
D	-2,8	-14,2	10,5	40	20,6	61,6	-21,6
Total				1375	284,12	1329	-93

A. Estadígrafos de los isótopos (valores anuales)

Indicador	n	x_m	x_w	DS	CV
$\delta^{18}\text{O}$	120	-3,2	-2,75	0,996	-0,36
$\delta^2\text{H}$	120	-17,099	-13,36	7,94	-0,59
d	120	8,56	8,29	2,02	0,24

B. Estadígrafos de los valores estacionales. Período seco o menos lluvioso (noviembre-abril)

Estadígrafo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d	LL	T	ETR	H
n	120	120	120	120	120	120	120
x_m	-2,05	-7,43	9,18	52,7	21,4	72,2	-19,5
x_w	-2,16	-8,46	9,21				
DS	0,78	6,38	2,38	16,5	1,26	14,97	8,35
CV	-0,38	-0,86	0,26	0,31	0,06	0,21	-0,43
Total				316	128,6	433	-117

C. Período húmedo (mayo a octubre)

Estadígrafo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d	LL	T	ETR	H
n	120	120	120	120	120	120	120
x_m	-3,46	-19,3	7,94	176,5	25,9	139	37,5
x_w	-3,52	-19,68	7,95				
DS	0,62	3,8	1,31	23,9	0,74	15,2	34,3
CV	-0,18	-0,2	0,16	0,14	0,029	0,11	0,92
Total				1059	155,5	834	225

Tabla 9. Constituyentes principales en las aguas provenientes de aguaceros específicos en la Estación Colón (concentraciones en mEq/L; n, número de determinaciones; σ , Desviación Estándar, CV, Coeficiente de Variación

Constituyente	n	Mínimo	Máximo	Media	σ	CV
SPC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	126	32	100	60,5	18,8	0,31
pH	126	5,5	8,15	7,05	0,76	0,11
HCO_3	126	0,19	0,89	0,46	0,16	0,34
SO_4	118	0,03	0,35	0,09	0,08	0,78
Cl	126	0,05	0,32	0,18	0,07	0,39
Ca	126	0,23	0,98	0,49	0,18	0,36
Mg	126	0,03	0,24	0,13	0,05	0,41
Na	119	0,01	0,19	0,07	0,04	0,56

K	114	0,01	0,05	0,03	0,01	0,34
Dureza Total (mg/L)	126	15	55	30,95	9,47	0,31
TDS	126	30	86,0	53,65	13,66	0,26

Tales condiciones de contorno deben ser tomadas en consideración al aplicarse las técnicas de hidrología isotópica para caracterizar procesos de mezcla de aguas, sobre todo, en el caso de la intrusión marina. Del mismo modo, al intentar caracterizar los procesos de recarga natural, o el resto de los efectos de fraccionamiento, tales condiciones de borde pueden transformarse en limitaciones de cierta magnitud.

La presencia de **aguas connatas** en las pequeñas islas del Caribe es un fenómeno más común de lo que a primera vista pudiera parecer. En muchos casos, estas aguas están, en alguna medida, mezcladas con aguas más jóvenes de manera que la mezcla isotópica varía en un amplio espectro. Aguas marinas atrapadas en los sedimentos de edad Eoceno y posteriores resultan de las diferentes fases transgresivas del Neógeno y en especial, del Cuaternario, en que el nivel del mar osciló glacieustáticamente en un rango estimado entre +190 y -250 m respecto al nivel actual.

El comportamiento de la curva de ajuste muestra una tendencia al enriquecimiento en $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ con el incremento de la concentración de cloruros, pero con una pendiente general muy baja. Los interceptos, muy próximos a los valores actuales, además de indicar las mezclas en los casos de baja mineralización se fijan en valores semejantes a los de aguas de reciente infiltración. La pendiente se hace más brusca, en ambos isótopos, a partir de los 5 g/l interceptando valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ notablemente enriquecidos y superiores a los valores actuales del agua de mar. Los valores reportados hace tiempo por Clayton et al. (1966) para las salmueras de la cuenca de Illinois muestran también valores muy enriquecidos respecto a la composición de la lluvia actual si se comparan con la recta de equilibrio $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ de la estación Chicago, de la red GNIP IAEA, pero se ajustan más al intercambio que a un ajuste neto de evaporitas. En este caso, los valores bajos de isótopos estables fueron asumidos como característicos de la precipitación pleistocénica. Los casos extremos introducen el problema de la composición isotópica de las precipitaciones en las áreas no glaciadas durante el Cuaternario y, en general, de los factores que condicionaron el balance hídrico durante el Pleistoceno. Por un lado, como propusieron en su momento Clayton y sus colaboradores, las aguas más enriquecidas en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, se consideran asociadas a las precipitaciones durante los períodos glaciales del Pleistoceno.

Procesos de fraccionamiento

Por lo que concierne a los efectos de fraccionamiento, el "**efecto de cantidad**" (Dansgaard, 1964; Eriksson, 1967, 1976, 1983), definido como la relación inversa entre la concentración en isótopos y la lámina de lluvia mensual se manifiesta perfectamente en las estaciones cubanas (Fig. 17). Molerio (1992) encontró que los valores del coeficiente de correlación son considerablemente elevados (-0,8 para el $\delta^{18}\text{O}$ y -0,83 para el $\delta^2\text{H}$) con una certidumbre del 95%. Incluso para la lámina de lluvia anual obtuvo una excelente correlación (-0,92) entre ella y la concentración media de $\delta^{18}\text{O}$.

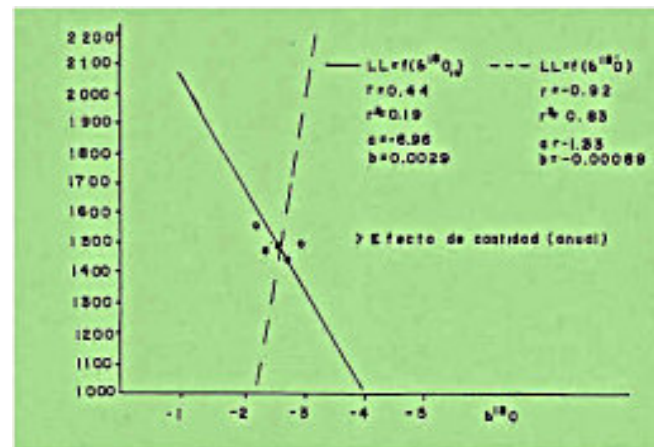


Fig. 17. Efecto de cantidad de lluvia respecto al fraccionamiento del $\delta^{18}\text{O}$.

Para los valores anuales, la **tasa de empobrecimiento en $\delta^{18}\text{O}$** es de -0,89 ‰./1000 mm. Para los valores mensuales es de -1,2 ‰./100 mm y de -10 ‰./100 mm, respectivamente, para el Oxígeno-18 y el Deuterio.

La relación entre la **temperatura media del aire y la concentración en isótopos estables**, para valores mensuales, resultó también aceptable: -0,7 para el $\delta^{18}\text{O}$ y -0,78 para el $\delta^2\text{H}$. Las rectas de ajuste mínimo cuadrático muestran pendientes de empobrecimiento respectivo de -0,28 y -2,49 ‰./°C de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Las correlaciones entre el exceso de Deuterio respecto a la lluvia y la temperatura son mucho menos significativas, aunque más elevadas -como es de esperar- respecto a esta última.

La influencia de la **cantidad de lluvia y de la variación de temperatura** es mucho más acentuada si se separan de acuerdo con la estación del año. La diferencia en la concentración media y media ponderada es notable. Para el $\delta^{18}\text{O}$ es del orden de -1,4‰. más baja en el período húmedo que en el seco; lo mismo ocurre para el $\delta^2\text{H}$, donde la diferencia es del orden de -11 ‰. Mucho más acentuada, como es de esperar, resulta la diferencia entre los valores de exceso de Deuterio.

Al comparar los estadígrafos estacionales el comportamiento isotópico puede explicarse perfectamente. La lámina de lluvia media mensual en el período húmedo es 3,3 veces mayor que la de invierno (período seco o menos lluvioso). Asimismo, en los meses de verano, la temperatura media mensual es 4,5°C más alta que en invierno, provocando una evapotranspiración real casi el doble que la de invierno, con la salvedad de que, durante el período seco, el déficit de humedad es siempre negativo, oscilando alrededor de los -115 mm. Tales diferencias incrementan el enriquecimiento invernal en isótopos de manera significativa.

El último estudiado fue el **efecto de altitud**. Los valores ponderados de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ a muestran un empobrecimiento en isótopos estables con la altura, del orden de -0,0074/m y -0,00192/m, respectivamente para el $\delta^{18}\text{O}$ y el $\delta^2\text{H}$. Los coeficientes de correlación obtenidos fueron, también, significativos (-0,86 y -0,94 para el Deuterio y el Oxígeno-18). El fenómeno más notable es el hecho de que los bajos valores isotópicos encontrados en la llanura están relacionados con la infiltración rápida en conductos cárlicos profundos de aguas provenientes de lluvias abundantes, con valores más negativos de los isótopos estables, como ha sido descrito por Arellano, Molerio y Surí (1992) a partir de la data de la Estación CR (Figs. 18 y 19).



Fig. 18. Contraluz desde el primer salto de la Furnia del Agua, en Cinco Pesos, Pinar del Río, donde las aguas subterráneas tienen prácticamente la misma composición isotópica estable que las de infiltración y las que se recogen en la llanura, a unos 150-300 metros de diferencia de altitud (Foto del autor)

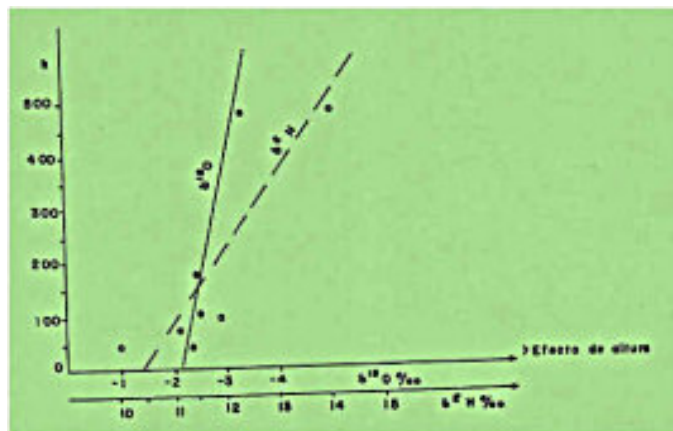


Fig. 19. Efecto de altura.

El efecto de distancia a la costa

Los valores obtenidos del coeficiente de correlación (-0,94 para la costa Sur y 0,51 para la distancia a la costa Norte) resultan indicadores indirectos de los rasgos de continentalidad y distancia a las fuentes de vapor de agua. Tomando como referencia la costa Sur del país, el $\delta^{18}\text{O}$ se empobrece tierra adentro con un gradiente ponderado de -0,0667 ‰/km de distancia a la costa; el alto valor del coeficiente de correlación indica una fuerte dependencia de la concentración de $\delta^{18}\text{O}$ respecto a la costa Sur; ello puede indicar la posición de la fuente principal de vapor a las lluvias producidas durante el período de muestreo (Fig. 20).

En tal sentido debe señalarse, también, que tal empobrecimiento hacia el interior del país, desde el Sur, es un indicador de alguna o ambas de estas posibilidades: a/ la tasa de empobrecimiento en isótopos se incrementa según el vapor avanza hacia el interior del país, de manera que sucesivas reevaporaciones y recondensaciones reducen su concentración

antes de ser finalmente precipitadas; b/ existe una fuente terrestre, de tipo continental, que provoca la presencia de vapores relativamente más empobrecidos en isótopos estables.

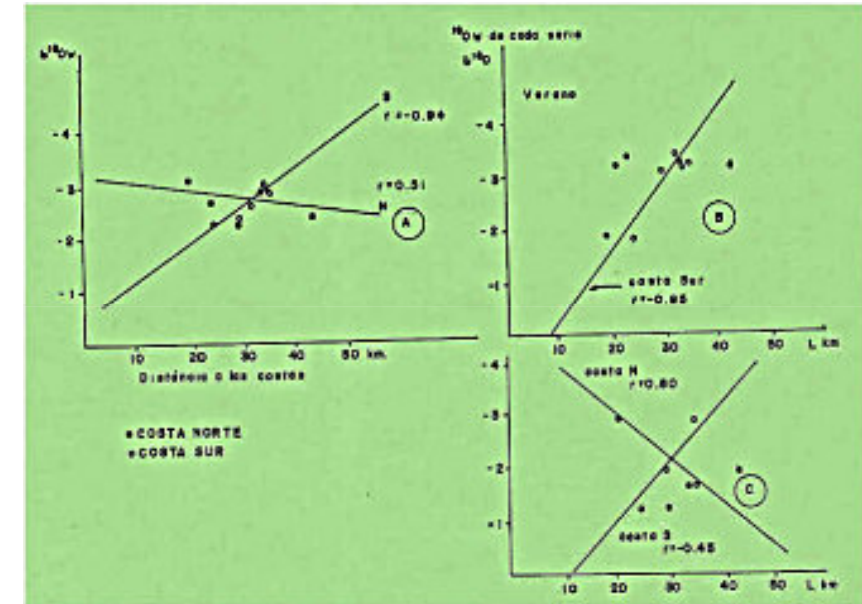


Fig. 20. Efecto de la distancia a las costas Norte y Sur sobre el fraccionamiento del $\delta^{18}\text{O}$.

En cuanto concierne a la relación entre la concentración de $\delta^{18}\text{O}$ y la distancia a la costa Norte, el signo del coeficiente de correlación se torna positivo y, aunque muy bajo, indica una componente de comportamiento inverso en la concentración isotópica. Las precipitaciones se enriquecen en $\delta^{18}\text{O}$ según se avanza hacia el interior del país. Si este comportamiento es una regularidad, sugiere que, en determinados momentos, puede encontrarse una influencia de lluvias originadas en otra fuente de evaporación diferente del Mar Caribe, posiblemente asociado con lluvias frontales en invierno y al control del Anticiclón de las Bermudas.

Los valores ponderados de $\delta^{18}\text{O}$ en verano para todas las estaciones del país muestran, con un alto coeficiente de correlación (-0,85), la fuerte dependencia entre la concentración del isótopo de referencia y la distancia a la costa Sur. El signo indica el decrecimiento de la concentración tierra adentro, con una pendiente de -0,128 ‰/km. La concentración media esperada, en la línea de la costa, de acuerdo con el intercepto calculado, es positiva, del orden del 1 ‰ $\delta^{18}\text{O}$, indicativa de la fuerte influencia de los aerosoles marinos. Del mismo modo, parece quedar claro que la fuente de vapor de las lluvias se debe encontrar en el Sur, en el Mar Caribe. En verano, por otro lado, no existe ninguna correlación significativa con la distancia a la costa Norte, lo que indica la independencia entre la composición isotópica (en ^{18}O) y cualquier fuente de vapor situada al Norte del país.

Sin embargo, en invierno, el cuadro es diferente. La mejor correlación (+0,6) fue encontrada con la distancia a la costa Norte de las estaciones. El signo positivo indica un proceso inverso en el cual se debe esperar un enriquecimiento invernal motivado por el predominio de lluvias frontales asociadas al avance de masas de aire frío desde el continente, al Norte. Por añadidura, no dejó de encontrarse una cierta correlación con la distancia a la costa Sur, en invierno (-0,45) que indica la presencia de otra fuente de vapor, en el Mar Caribe, que debe funcionar durante el período comprendido entre cada "frente frío".

Definir los **miembros terminales** de los isótopos estables resulta especialmente importante para establecer tanto la cinética del proceso del fraccionamiento, como los procesos de intercambio que ocurren en las distintas fases del ciclo hidrológico y en los diferentes escenarios donde tales fases tienen lugar. Por tal motivo, una aproximación al entorno de

valores que caracterizan la composición isotópica del agua de mar, la evaporación, y la lluvia es imprescindible para caracterizar los procesos de transporte desde el océano en la atmósfera y en tierra firme.

En cada caso, es especialmente útil conocer, además, el mecanismo de fraccionamiento estacional y, en cada estación del año, entre aguaceros y evaporaciones sucesivas. Ello es necesario, toda vez que en las islas tropicales la principal causa del deterioro de la calidad de las aguas subterráneas es la intrusión de las aguas de mar. Pero además, las pérdidas por evapotranspiración en acuíferos someros son realmente elevadas, aun cuando las cifras que se citan en la literatura pueden no ser muy exactas. En el Trópico Húmedo, por añadidura, la estación lluviosa es particularmente intensa y ello representa una renovación muy alta del agua atmosférica (Craig y Gordon, 1965; Ericsson, 1967, 1976, 1983; Gat y Gonfiantini, 19981; Clark y Fritz, 1997; Anati y Gat, 1988; Scout, 1967; Yurtsever y Gat, 1981; Weiss y Roether, 1980; Gonfiantini y Simonot, 1987; Ferronsky y Brezgunov, 1980; Gat y Tzuer, 1967; Clayton et al., 1966).

Fuentes y pérdidas

En cuanto concierne al **agua oceánica**, la fuente principal de vapor de agua para las precipitaciones es el agua del océano. De acuerdo con el grado de comunicación entre los mares y los océanos, la composición isotópica del agua de mar variará; esta variación también depende de la carga de agua dulce que, por escurrimiento (superficial y subterráneo) ingrese al océano.

Como se señaló antes, las fuentes de vapor de agua para las precipitaciones cubanas se localizan en dos zonas diferentes de acuerdo con la época del año: en verano, en el Mar Caribe por la influencia de las bajas presiones ecuatoriales; en invierno, la fuente más importante la constituye el Océano Atlántico, como resultado del movimiento del Anticiclón de las Bermudas. La influencia ecuatorial, sin embargo, no llega a anularse en invierno, y esto es un hecho que debe ser tenido en cuenta.

Por cuanto corresponde a la influencia del Mar Caribe como fuente de vapor de agua, su composición isotópica es determinante en la de la lluvia. La comunicación del Caribe con el Océano Atlántico es, en alguna medida, limitada. Los valores reportados por Araguás y Gonfiantini (1992) en la superficie del mar en Haití y Jamaica son, respectivamente, de 0,76 a 0,91 en $\delta^{18}\text{O}$ y de 6,3 a 7 para el $\delta^2\text{H}$. Para los valores que se reportan en las aguas de lluvia en Cuba, tales concentraciones están fuertemente enriquecidas en isótopos estables. En el Atlántico, se reportan concentraciones, en superficie, de $\delta^{18}\text{O}$ que oscilan entre -3,34 en Groenlandia hasta +1,32 en el Ecuador. La estación Weathership E, de la red GNIP-IAEA reporta valores medios de -3,16 y -16,4%. para el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente, para la lluvia a la altura del nivel del mar en el Atlántico Norte. Para la misma latitud, Araguás y Gonfiantini (1992) reportan valores de +1,11 y +6 de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente, en las aguas del océano. De esta manera, como base de estimación pueden tomarse los valores que se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. *Composición isotópica de las aguas de los mares que rodean a Cuba.*

Zona	$\delta^{18}\text{O}_{\text{máx}}$	$\delta^2\text{H}_{\text{máx}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{med}}$	$\delta^2\text{H}_{\text{med}}$
Caribe	+1,0	+7,0	+0,84	+6,7
Atlántico	+1,32	+5,0	+0,86	+5,0

Por lo que respecta a las **aguas evaporadas y condensadas**, en Cuba no existen mediciones de la composición isotópica del vapor de agua, ni tampoco observaciones respecto a la temperatura en la base de la nube, o la concentración en isótopos estables de lluvias de diferente tipo genético o tomadas a intervalos durante un aguacero. En consecuencia, las apreciaciones de Molerio (1992) son meramente cualitativas y se derivan de la generalización de los datos disponibles en las muestras de agua de lluvia que ya se han discutido en párrafos anteriores. Como regla, las aguas de lluvia sufren sucesivas evaporaciones y condensaciones antes de ser finalmente precipitadas. De esta manera, los miembros terminales, en invierno y en verano pueden tomarse, en primera aproximación, como los máximos de enriquecimiento y

empobrecimiento en isótopos estables. Por ellos, los valores máximos esperados son del orden de -5%. ($\delta^{18}\text{O}$) y -30%. ($\delta^2\text{H}$), según puede derivarse del comportamiento de la serie disponible, cuya media histórica no registra valores más altos, aunque sí muy próximos.

Las aguas netamente provenientes de evaporación presentarán, como es de suponer, una pendiente aún más baja que 7,3 correspondiente a la recta meteórica del país y que, a su vez, es inferior a la de la recta mundial, tomada como línea de equilibrio $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$. De acuerdo con la Tabla 11, la pendiente de la recta de evaporación es del orden de 4,57, en el rango reportado por Gat (1981), ligeramente más alta que la media mundial, lo que es fácilmente explicable tomando en cuenta las características de la alternancia rítmica y la intensidad de la pluviometría y evaporación en el país.

Tal pendiente corresponde a los valores de los meses de verano, donde la evaporación, como consecuencia de la elevada temperatura del aire, es más intensa. La pendiente de los valores de invierno, con temperatura más baja, es del orden de los 7,25, prácticamente idéntica a la línea de equilibrio $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ de Cuba (7,296). En ambos casos, se superpone el efecto de la cantidad de lluvia, muy superior en verano que en invierno.

Los **procesos de ultrafiltración** se desplazan con una pendiente muy baja, entre 4 y 0, correspondiendo este último caso a los procesos de intercambio. Como pendiente más adecuada, Molerio (1992a) seleccionó 2% para el caso de la ultrafiltración.

Tabla 11. *Parámetros de ajuste de las rectas meteóricas locales y nacional (a, pendiente; b, intercepto; c, coeficiente de correlación; r^2 , coeficiente de determinación).*

Estación	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d	a	b	r	r^2
CR				8,08	6,9	0,89	0,79
ES				8,97	7,85	0,97	0,93
CA				7,18	7,41	0,83	0,69
SA				6,45	5,65	0,73	0,43
FR				7,17	6,95	0,9	0,81
CUBA	-2,75	-13,36	8,3	6,73	7,296	0,92	0,84

Recta Meteórica Cubana

La Fig. 21 muestra las rectas meteóricas de cada estación, la del país y la media mundial. La Fig. 22 muestra la **Recta Meteórica Nacional Cubana** y sus componentes y presenta pendiente e intercepto muy similares a los de la línea de mezcla con el Mar Caribe, excluyendo Bermuda y, particular muy semejante a Barbados. Tanto la pendiente como el intercepto de la recta de ajuste mínimo cuadrático son más bajos, ligeramente que la Recta Meteórica Mundial (≈ 8 y ≈ 10 , respectivamente). Ello confirma:

1. El Caribe es la fuente más importante -aunque no la única- de suministro de vapor de agua para las precipitaciones cubanas;
2. Los procesos que conducen a las sucesivas reevaporaciones y recondensaciones del agua meteórica tienen lugar muy próximas al equilibrio $\delta^2\text{H} - \delta^{18}\text{O}$ en el mar;
3. el empobrecimiento en isótopos es notable, en las aguas de lluvia, sólo en los meses de verano, donde se conjuga la influencia de las altas temperaturas, elevada evapotranspiración y mayor cantidad de lluvia;
4. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ cercanos a los valores límite en el gráfico, no resultan indicativos, "a priori", de los procesos que controlan el fraccionamiento y, en general, deben para ello, ser tomados por debajo de -4 y -20%. de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$.

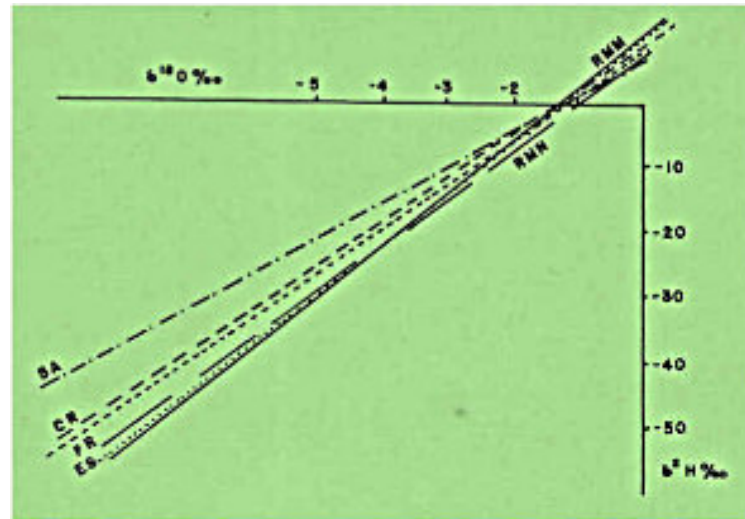


Fig. 21. Rectas Meteoricas locales ajustadas, Nacional (RMN) y mundial (RMM)

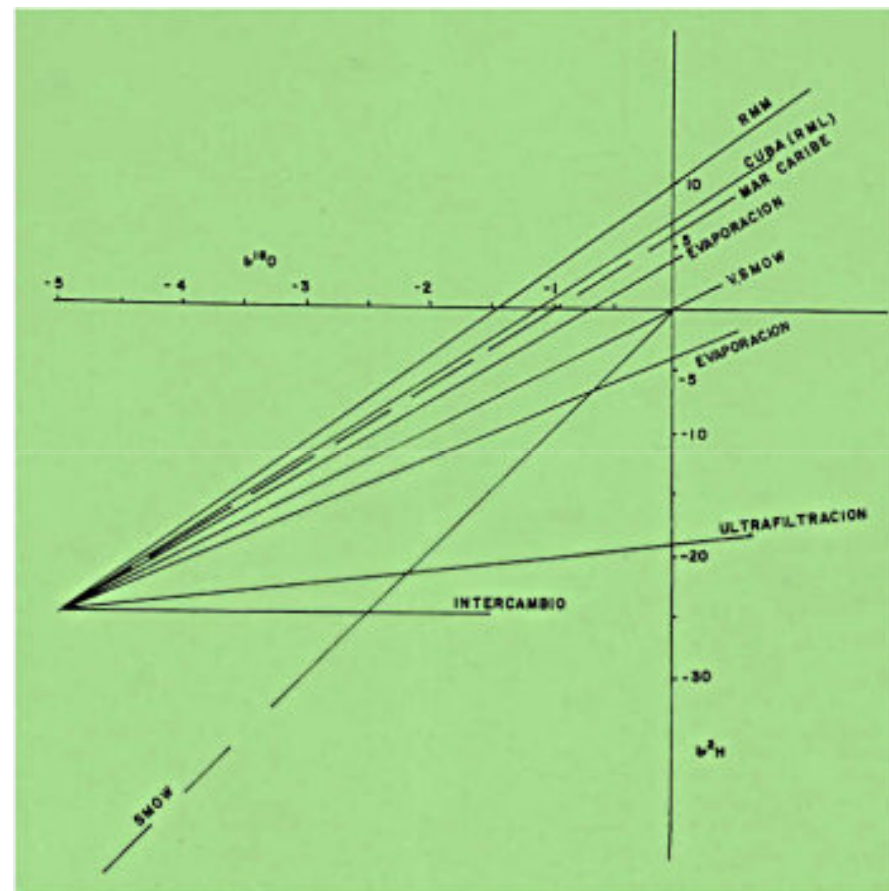


Fig. 22. Recta Meteorica cubana (RML) y sus componentes. Rectas Meteorica Mundial (RMM/V-SMOW; $\delta^2H = 8.5180 + 10$), Meteorica Local (RML; $\delta^2H = 7.415180 + 7, 18$; Molerio et al. 1994) y de Evaporación local ($\delta^2H = 10.5180 + 4$; Molerio, 2020)

Boschetti et al. (2015), basados en la baja actividad isotópica (δ^2H) vs. ($\delta^{18}O$) tomando como referencia la Recta Meteorica Mundial (VSMOW, Vienna Standard Mean Ocean Water) y la Línea Cuba SMOW (Arellano et al., 1994; Arellano, Molerio y Surí, 1992; Molerio, 1992) y el cálculo de la altura de la zona de recarga (según la ecuación de Molerio, 1992) sugieren, que una fuerte componente del eventual aporte de las aguas del acuífero Jurásico profundo puede provenir de los relieves montañosos de la Sierra de los Órganos, al Este de la región (Fig. 23).

Esta idea fue introducida en su momento por Peláez y González (2013). Los ajustes de la ecuación, sobre datos locales, permiten suponer que, en efecto, parte de la recarga provenga de zonas más elevadas, fuera de la región. Pero igual no excluyen la posibilidad que los bajos valores isotópicos encontrados también estén relacionados con la infiltración rápida en conductos cársmicos profundos de aguas provenientes de lluvias abundantes, con valores más negativos de los isótopos estables. Un fenómeno semejante al descrito por Arellano, Molerio y Surí (1992) para otros sectores de la Llanura Meridional de Pinar del Río, al Este de la Península de Guanahacabibes.

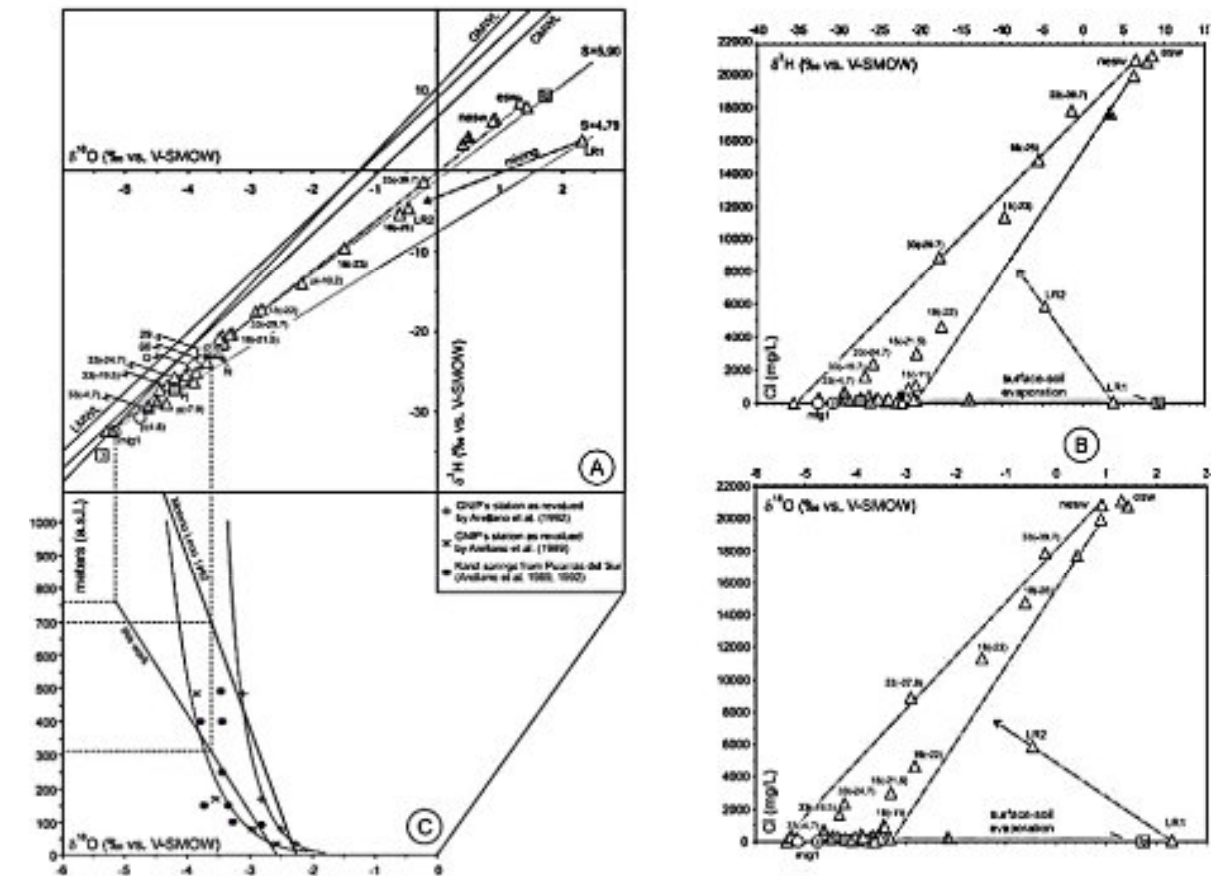


Fig. 23. (A) Composición isotópica estable de Deuterio (δ^2H) vs. Oxígeno ($\delta^{18}O$) expresados en ‰ vs. V-SMOW. GMWL = Línea Meteorica Mundial; LMWL = Línea Meteorica Local (Boschetti et al., 2013); CMWL = Línea Meteorica de Cuba (Molerio León 1992; Molerio León 2012). Se muestran los efectos de mezcla y de evaporación en líneas discontinuas y punteadas con destaque de aguas marinas evaporadas (esw) y no evaporadas (nesw). (B) $Cl (mg/L) = f(\delta^2H)$, $\delta^{18}O$. (C) Altitud en metros derivada de la composición isotópica de $\delta^{18}O$ (tomado de Boschetti et al., 2015).

Ya Dansgaard (1964) señaló que la pendiente de la relación $\delta^{18}O$ - δ^2H está vinculada con la relación entre ambos isótopos durante el proceso de condensación. Así, la desviación en la pendiente media de la “línea de equilibrio” se debe a las variaciones estacionales en las condiciones de evaporación en la zona donde se origina el vapor. El valor del intercepto, que también depende de las condiciones de evaporación en la zona de aporte se aparta, en casos considerablemente, del intercepto de la “línea de equilibrio”. Como es de esperar, el parámetro d también se aparta del valor medio mundial de ± 10 y, en general, es más bajo. Muchas estaciones vinculadas a la fuente de vapor que constituye el Mar Caribe presentan este comportamiento (Veracruz, San Juan, Barbados, Howard) La diferencia es menor en los casos de continentalidad manifiesta o vinculadas a otras fuentes de origen del agua precipitable, como Hatteras, Bermuda, Cayenne y Maracay. Aun cuando la desviación del valor medio mundial es del mismo orden en las estaciones caribeñas (-1,7 a -2,0) que en las

de continentalidad neta (-0,6 a +1,9) las diferencias básicas se encuentran asociadas a la variación estacional de la temperatura media del aire que, de modo determinante condiciona los procesos de fraccionamiento cinético

Miembros terminales en el Polígono de prueba y aproximación conceptual y metodológica al balance de masas

La Fig. 24 muestra la distribución genérica de los miembros terminales de las aguas terrestres y marinas en el Polígono de prueba. La Fig. 25 muestra la transición de los tipos de aguas entre los extremos de agua fresca a agua intrusionada por el mar.

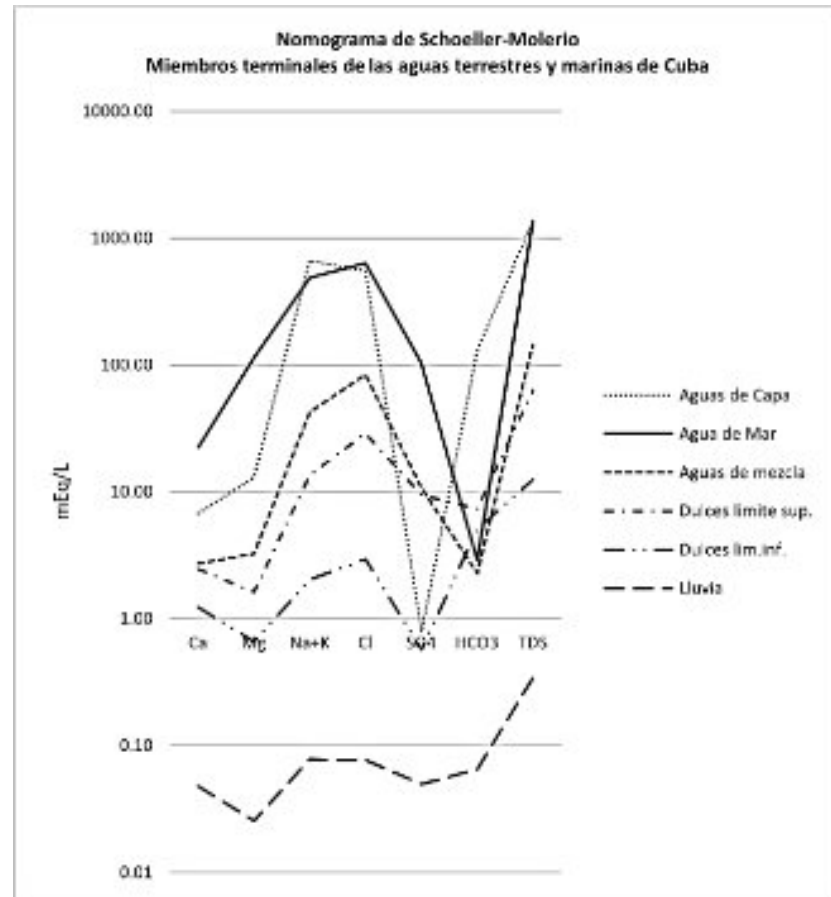


Fig. 24. Miembros terminales de las aguas de Cuba.

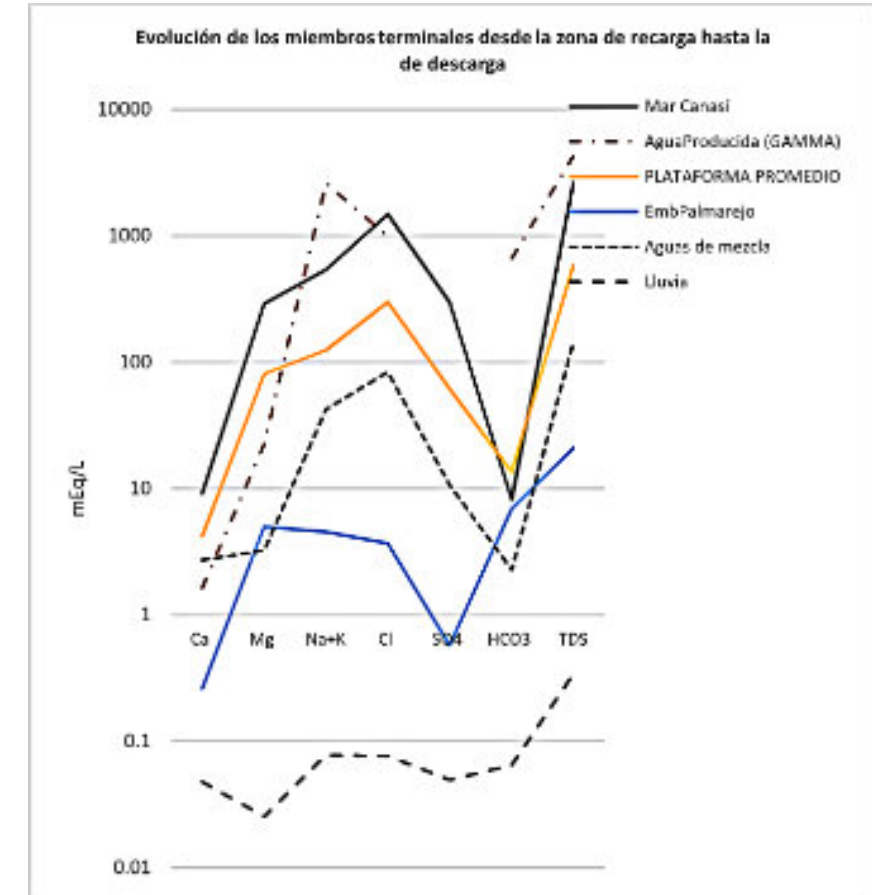


Fig. 25. Cambios en el carácter químico de las aguas a lo largo de la línea de flujo principal en el acuífero carbonatado de Canasí.

Esta distribución espacial demuestra cómo el movimiento de la zona de recarga a la de descarga provoca un cambio sistemático en la composición química de las aguas subterráneas debido a la disolución de los minerales del acuífero incrementando la concentración de los iones fundamentales (macroconstituyentes) expresados en el aumento de la mineralización total hasta que el carácter cambia, por la presencia de intrusión marina, de aguas predominantemente bicarbonatadas a cloruradas por mezcla simple entre las aguas frescas y las marinas a partir de cierto punto en el sistema hidrológico natural. Este intercambio se ajusta a la variación esperada que se deriva de la Secuencia de Chebotarev y es una combinación que reúne los dos extremos del comportamiento de la hidrodinámica geoquímica en los acuíferos cársicos; por un lado, a) la pauta derivada del proceso exclusivo de disolución de los minerales del complejo carbonatado del acuífero y, por otro, b) de la suma de este proceso con el de la mezcla simple con las aguas marinas en el ecotono litoral. Un comportamiento de este tipo fue clásicamente estudiado por Back y Hanshaw en 1970 en las penínsulas de La Florida (Estados Unidos) y Yucatán (México).

La consistencia de esos procesos depende de la capacidad de la solución para permanecer insaturada o adquirir insaturación en su paso de la zona de aereación a la zona freática, permitiendo la capacidad para disolver y depositar calcita en la zona de aereación y, más adelante, de insaturarse por debajo del nivel de las aguas subterráneas.

Ello da origen a serios problemas teóricos que han requerido un examen muy cuidadoso desde principios de los 60 del pasado siglo (Weyl, 1958; Back, 1960, 1963, 1966; Bögli, 1960; Hsu, 1963; Hanshaw, Back y Deike, 1981; Barnes y Back, 1964; Thrailkill, 1968; Back y Hanshaw, 1970, 1971; Shuister y White, 1971; Back et al., 1983; Back, Hanshaw y Van Driel, 1984; Dreybrodt, 1988; Dreybrodt y Buhmann, 1991; Dreybrodt et al., 1992; White, 1997) e impone no pocos problemas teóricos para el tema de la inyección somera (Molerio, 2021c) que serán examinados en este informe y, más allá, para los problemas geotécnicos que implica la evaluación de la actividad cársica (Molerio y Marrero, 2020).

La aplicación del balance de masas se fundamenta en el siguiente postulado (Plummer y Back, 1980:181):

“Si el cambio en la composición química del agua entre puntos arbitrarios de inicio y final en un sistema de aguas subterráneas puede atribuirse solamente a los efectos de las reacciones, las reacciones químicas netas que condicionan el cambio pueden ser cuantificadas a partir de las relaciones del balance de masas. Más aún, si el sistema está en régimen permanente; esto es, que la composición de la solución permanece constante con el tiempo en un mismo sitio, el conocimiento de la transferencia de masas y el tiempo de flujo entre los puntos inicial y final puede utilizarse para calcular las tasas promedio de las reacciones efectivas”

En términos de hidrogeoquímica comparada, los términos de base necesarios para la analogía entre dos o más sistemas acuíferos serían la transferencia de masas, la edad de las aguas (definidas por su tiempo de tránsito), la velocidad media de flujo y las tasas aparentes de reacción. Los procesos geoquímicos gobernantes son: a) la mezcla entre los miembros terminales (la composición inicial es también un miembro terminal); b) los flujos de gas de dióxido de carbono y c) la disolución/precipitación de los minerales.

Pero como señalan Appelo y Postma (2005), debe tenerse en cuenta que el balance de masas es un resumen general en el cual las fluctuaciones de las concentraciones en tiempo y espacio se promedian y los ciclos biogeoquímicos internos se desprecian. No obstante, la reclusa y aprovechamiento de los elementos por la vegetación y su almacenamiento como biomasa creciente o su liberación desde materia orgánica en descomposición puede influir poderosamente en la concentración de los elementos en el agua lixiviada desde el suelo.

Por su carácter conservativo, se adopta comúnmente el ion cloruro (Cl) en el balance de masas. De igual modo puede utilizarse como trazador natural.

Considerando $m_{i,mix}$ la molalidad del constituyente conservativo, i, en una mezcla de aguas de dos miembros terminales, y siendo $m_{i,1}$ y $m_{i,2}$ las molalidades de i en los miembros terminales 1 y 2, el balance de masas de i resulta:

$$m_{i,mix} = x m_{i,1} + (1 - x) m_{i,2}$$

Donde x, es la fracción de la mezcla 1 en el conjunto, de ahí que pueda definirse como:

$$x = \frac{m_{i,mix} - m_{i,2}}{m_{i,1} - m_{i,2}}$$

De este modo, a partir de la diferencia en la proporción de los conservativos que se mantienen en la mezcla puede estimarse la magnitud de los procesos no conservativos, como la degasificación de CO₂, fotosíntesis y la disolución/precipitación de minerales que afectan la evolución de la mezcla.

Conociendo la composición inicial y final de las aguas y una vez definidas las reacciones que tienen lugar a lo largo de la línea de flujo desde la zona de recarga a la de descarga o a partir de dos puntos arbitrarios en el espacio asumidos conectados por una línea singular de flujo (Molerio,) puede establecerse un balance de masas basado en el cambio de molalidad del i-ésimo constituyente resolviendo las n ecuaciones, cada una para un constituyente, que tienen lugar, en la forma de:

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_{c,j} = \Delta m_c \quad |_{c=1,n}$$

Donde ϕ Es el número total de minerales y gases (reactantes o productos) en la reacción de balance de masas; n, es el número mínimo de constituyentes necesarios para definir la composición de los minerales y gases seleccionados; α_j , es el coeficiente estequiométrico del j-ésimo mineral o gas en la reacción, expresado en moles por kg de H₂O (con signo positivo se para los reactantes y negativo para los productos); $\beta_{c,j}$, es el coeficiente estequiométrico del c-ésimo constituyente en el j-ésimo mineral o gas y Δm_c es el cambio en moles por kg de H₂O del c-ésimo constituyente en la fase acuosa a lo largo de la línea de flujo de la reacción (solución final menos la inicial).

Disponiendo de los valores de laboratorio para Δm_c y siendo n= ϕ las n ecuaciones de balance anterior se resuelven simultáneamente para definir los n valores de los coeficientes de reacción α_j . teniendo en cuenta que la principal limitación es que el máximo número de minerales que pueden ser considerados en el balance de masas es aun cuando se conozca que un determinado mineral pueda variar su estequiometría para varios de los n constituyentes.

Plummer y Back (1980) resolvieron este problema en su momento considerando solamente unas pocas composiciones que representen el rango conocido de la estequiometría del mineral en el sistema, sin perder de vista que la significación de la transferencia de masas debe reflejar el hecho de que puedan estar involucrados muchos minerales o incluso ligeras diferencias en la composición (:133).

La otra restricción importante es la dependencia de los coeficientes α_j de la precisión de los resultados de laboratorio, cuyos errores aumentan la incertidumbre en las determinaciones analíticas de Δm_c . En particular, si existen errores significativos en las mediciones del pH o las molalidades totales de los constituyentes disueltos, el pH que se pronostique mediante la simulación diferirá sustancialmente del valor medido. El sistema que se considera aquí es CaO-MgO-K₂O-Na₂O-CO₂-H₂SO₄-HCl-H₂O

La distribución de las molalidades a lo largo de la línea de flujo principal se muestra en la Fig. 26 absolutamente consistente con la distribución de las concentraciones de los macroconstituyentes principales que se presentó anteriormente. La compatibilidad de las aguas producidas con el sistema hidrológico se muestra aquí mucho más claramente.

Efectos geoquímicos de la mezcla y el problema de la dolomitización

En los acuíferos litorales en contacto abierto con el mar tiene lugar un grupo de reacciones químicas naturales debidas a intercambio entre las aguas dulces del acuífero, las salobres de la interface y las del mar. Al inyectarse aguas producidas, aguas de otra composición química y diferente temperatura y densidad se incorporan a esa mezcla dependiendo del sitio donde la MAP se está inyectando y a la profundidad a la que accede en el acuífero (en cualquiera de las tres disoluciones mencionadas.

Los procesos de intercambio iónico pueden ser tanto procesos de intercambio catiónico como procesos de intercambio aniónico. El que sea de un tipo u otro dependerá de la carga de la superficie sólida en contacto con la solución acuosa. La compatibilidad geoquímica se muestra en las Figs. 49 y 50. Los resultados más importantes son:

- Las aguas que integran el sistema multicomponente tienen una composición en macroconstituyentes semejante.
- La data correspondiente a las aguas de capa no muestra la existencia de verdaderas salmueras de petróleo. Por el contrario, como puede verse en las figuras correspondientes, todos los casos evaluados muestran aguas con mineralización igual o menor a las del mar en la zona de trabajo y de composición semejante a las aguas subterráneas lo que parece deberse a:
- Son aguas de horizontes carbonatados carsificados y/o con notable porosidad secundaria.
- Los tiempos de renovación son variables, pero más bien bajos.
- Las aguas de los yacimientos no parecen haber sido sometidos a procesos intensos de evaporación y concentración geoquímica.

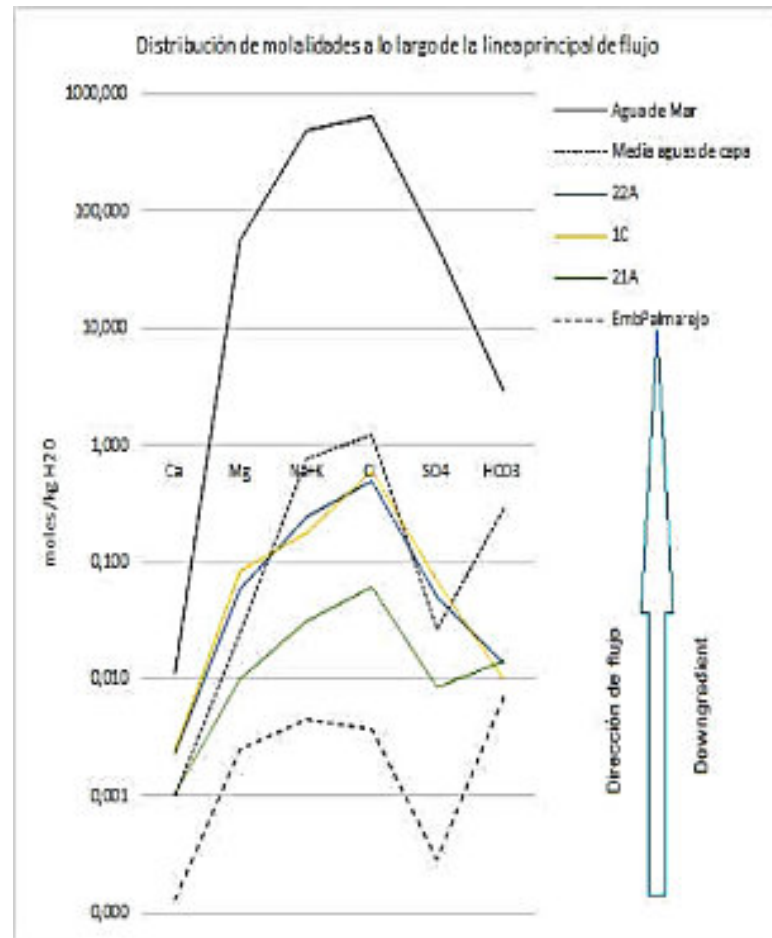


Fig. 26. Distribución de molalidades a lo largo de una línea de flujo principal en Canasí.

El indicador es especialmente importante para definir los procesos de intercambio entre fuentes de acuíferos carbonatados y los procesos de dolomitización y eventualmente de dedolomitización (Back et al., 1983). La Fig. 27 muestra cómo se acomodan perfectamente las concentraciones (aportes) de Mg y Ca, donde el único outlier de la serie espacial lo constituyen las aguas de mar, en el extremo derecho del gráfico. **Las aguas de capa/producidas se agrupan en la base, pero sobre la línea de ajuste Mg/Ca indicando procesos de adquisición Ca y Mg, semejantes, lo que constituye uno de los elementos más sólidos para corroborar la aceptabilidad ambiental de la mezcla aguas producidas/aguas subterráneas, al tratarse de aguas químicamente afines.**

El balance alcalino es un indicador importante para diferenciaciones más refinadas en torno a la distribución de los aportes salinos ($rNa+rK$) y los del sistema acuífero ($rMg+rCa$) y distingue (Fig. 28), de manera indirecta, el proceso de interacción agua-roca en el ambiente salino de las aguas del yacimiento respecto a las aguas de más reciente formación, relacionadas con los procesos de intercambio Plio-Cuaternarios y actuales. Los isótopos determinados (véase el apartado correspondiente) discuten este concepto.

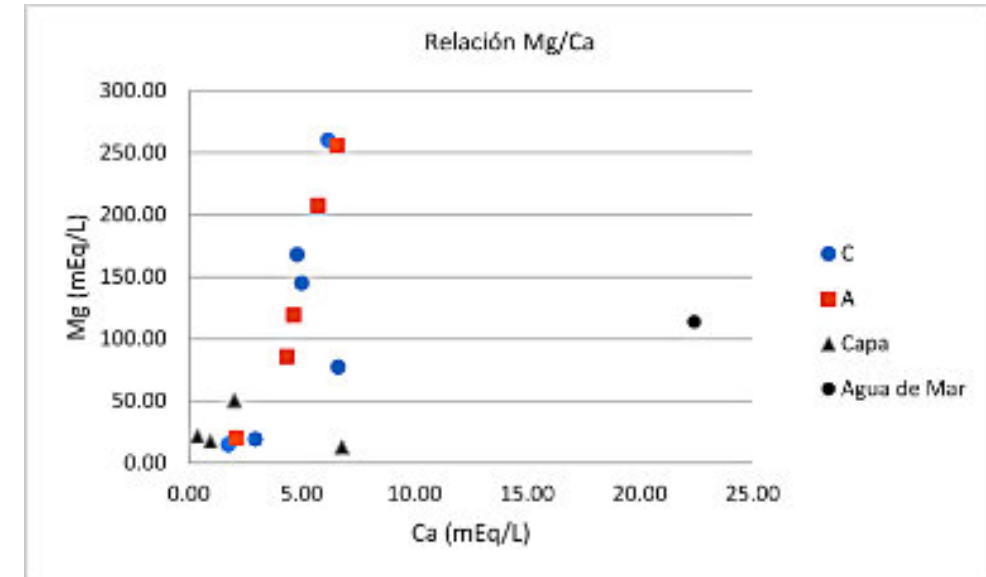


Fig. 27. Relación Mg/Ca en las aguas terrestres, marinas y producidas (capa) del yacimiento Canasí. C y A, son clusters de distintos tipos de aguas subterráneas. La distribución ajustada a valores bajos de las relaciones Mg/Ca en las aguas de capa muestra perfecta concordancia y afinidad con el desarrollo de aguas jóvenes provenientes de una matriz litofacial carbonatada semejante.

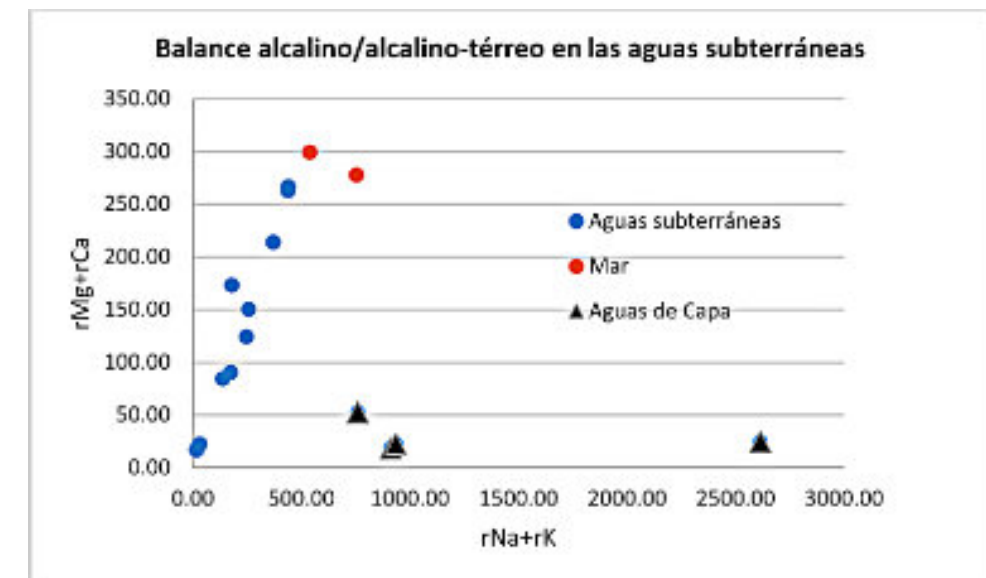


Fig. 28. Diferenciación de los tipos de agua a partir del balance de cationes alcalinos y alcalino-térreos.

Un filtrado más refinado de la firma Ca, Mg y Cl e las aguas se aprecia en las Figs. 29 y 30. Las aguas producidas/de capa se encuentran bien identificadas en el extremo derecho inferior de ambos gráficos.

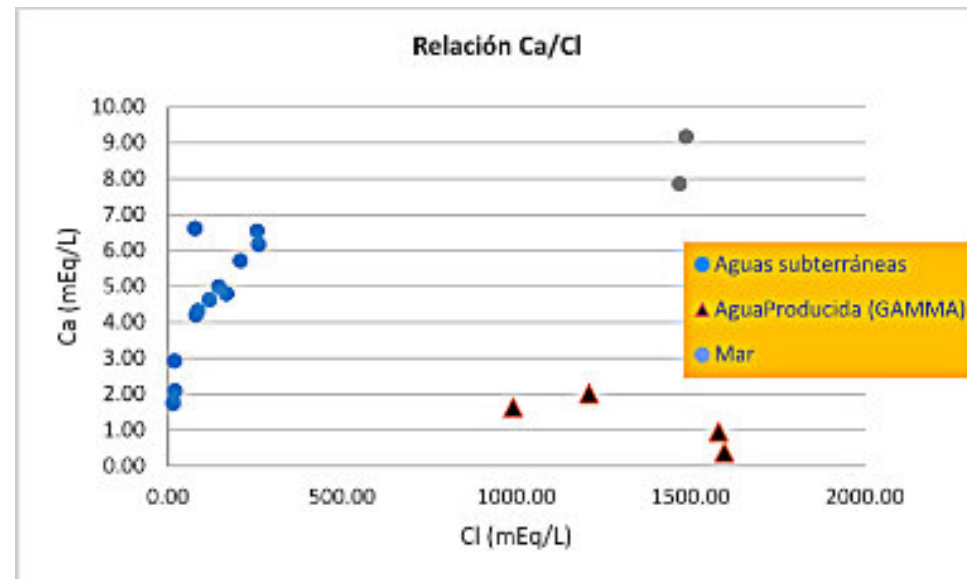


Fig. 29. Relación Ca/Cl

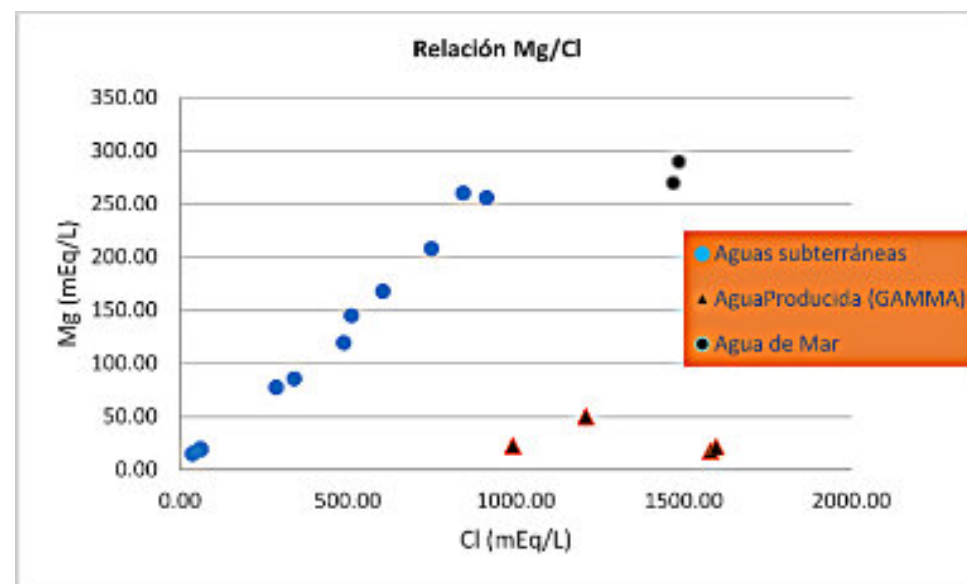


Fig. 30. Relación Mg/Cl.

Propiedades agresivas/incrustantes de la mezcla

En este caso, el problema es mucho más trascendente que el simple hecho de si la mezcla resultante de la incorporación de las aguas producidas tratadas y las aguas del acuífero puede provocar corrosión o incrustación en el sistema de camisas y ductos necesarios para la inyección somera y el transporte y tiene que ver directamente con la problemática del desarrollo del cavernamiento en la zona saturada del acuífero (zona freática) y de las relaciones de insaturación/saturación/sobresaturación de las soluciones carbonatadas a cloruradas que circulan en el sistema hidrológico natural al cual se incorporará, como recarga concentrada un volumen de agua de composición semejante, pero de temperatura, saturación respecto al calcio y magnesio diferente.

En el reporte anterior (Molerio, Martínez y Sardiñas, 2021) este tema fue tratado específicamente para el caso del yacimiento Canasí. Los problemas teóricos que ello conlleva para proyectos de este tipo han sido discutidos recientemente en algunas publicaciones por Molerio (2021d, 2021e, 2021f), pero ha sido un problema acuciosamente

detallado en la literatura por su vinculación directa con los problemas del desarrollo del cavernamiento en la zona freática, aunque está directamente conectado con la misma problemática espeleogenética en la zona vadosa (Weyl, 1958; Back, 1960, 1963, 1966; Bögli, 1960; Hsu, 1963; Hanshaw, Back y Deike, 1981; Barnes y Back, 1964; Thrailkill, 1968; Back y Hanshaw, 1970, 1971; Shuister y White, 1971; Back et al., 1983; Back, Hanshaw y Van Driel, 1984; Dreybrodt, 1988; Dreybrodt y Buhmann, 1991; Dreybrodt et al., 1992; White, 1997).

El problema planteado por Hanshaw, Back y Deike (1971) es el siguiente:

“...los océanos están aparentemente en la zona de saturación o más allá con respecto a la calcita pura y a la dolomita, mientras que los sedimentos marinos modernos están compuestos por fases meta estables, aragonito y calcita de alto y bajo magnesio. El aragonito y las calcitas de alto magnesio están generalmente asociadas con fragmentos de conchas. Las rocas carbonatadas antiguas están básicamente constituidas por calcita de bajo magnesio y dolomita...las soluciones asociadas con formaciones dolomíticas modernas no presentan una relación Mg/Ca común que oscila entre 3 y 100...y la circulación de las aguas subterráneas puede desempeñar un papel significativo en la formación regional de dolomitas, pero para ello, uno de los requisitos es una fuente abundante de iones magnesio...la escasa cantidad de magnesio disponible en la disolución de calcitas magnésicas y dolomitas en la zona de circulación activa de las aguas subterráneas es insuficiente para suministrar la cantidad que se requiere para ello a menos que enormes cantidades de roca estén disponibles para la disolución; no obstante, la dolomita puede formarse en zonas de agua salobre...donde el magnesio que se requiere puede provenir de agua oceánica o de salmueras de reflujo asociadas a fluctuaciones relativas del nivel del mar...”

Thrailkill (1968) centra el problema en la aclaración de las condiciones que controlan la disolución/precipitación entre la zona vadosa o de aereación (para evitar confusiones no mencionaremos aquí esta zona hidrodinámica como no saturada al igual que la zona acuífera bajo el nivel de las aguas subterráneas será llamada zona freática y no zona saturada):

“Las aguas en los acuíferos carbonatados usualmente se supone que se trate de agua meteórica que se mueve desde la superficie a la profundidad a través de la zona vadosa...usualmente saturada o sobresaturada respecto a la calcita y por ello activamente deposita calcita...”

El hecho de que ocurra efectivamente condiciones para que las soluciones que discurren por la zona vadosa se insaturen respecto a la calcita (la dolomita también) depende según este autor de los controles siguientes y que, en su momento, **deben ser incorporados a la red de monitoreo del proceso:**

- ☐ Efecto de temperatura
- ☐ Efecto de mezcla (Bögli)
- ☐ Tasa de flujo

Todas las aguas terrestres están insaturadas respecto a la calcita, excepto las aguas marinas, todas ligeramente saturadas y, en menor grado, sobresaturadas. Respecto a las dolomitas, todas las aguas (marinas y producidas/de capa) están en la línea de saturación” (Tabla 13). Las aguas de mar y de mezcla de referencia utilizadas en el Nomograma de Schoeller-Molerio están todas saturadas/sobresaturadas respecto a la calcita y la dolomita. Las aguas de capa, sin embargo, están muy cercanas a la saturación.

La importancia de este asunto para los efectos del proyecto radica en que (Molerio, 2021d), la tecnología de inyección o vertimiento de la mezcla de aguas producidas (MAP) busca disponerla en una isócrona que garantice un tiempo de tránsito adecuado del fluido, habida cuenta que se ha identificado si la circulación ocurre sobre un sistema de flujo local, intermedio o regional (Tóth, 2009). En principio, elude ingresarla al nivel freático (o piezométrico) local por ser la zona de mayor velocidad de circulación —a menos que ahí se encuentren tiempos de tránsito adecuados—, sino que busca zonas adecuadas a mayor profundidad que retarden el movimiento de la mezcla (Fig. 31). **La mezcla de las aguas producidas,**

con las del acuífero provocará insaturación de la solución y un incremento de sus propiedades corrosivas. Otro tanto ocurrirá en la mezcla con las aguas de mar. Para ello, es necesario tener en cuenta el modo en que influyen la heterogeneidad y la anisotropía del sistema acuífero. En cualquier punto del acuífero, la anisotropía representa la variación de la conductividad hidráulica con la dirección y se diferencia de la heterogeneidad, que se refiere a la variación de un punto a otro (Palmer, 1999). La presencia de cavernas en el dominio de flujo de la inyección somera es la principal causa de la heterogeneidad y anisotropía a lo largo de la línea de flujo seleccionada para aplicar la tecnología.

Tabla 12. Relación de saturación a la calcita (RSC) y a la dolomita (RSD) en las aguas muestreadas.

Muestra/estación	RSC	RSD
Agua de Mar	2,669	1,89E+01
Aguas de mezcla	3,433	1,53E+01
Aguas de Capa	4,822	2,13E+01
Media aguas de capa	0,608	1,45E+01
Agua Producida (CEINPET)	0,432	1,42E+01
Agua Producida (SICOG)	-0,045	1,43E+01
Agua Producida (GAMMA)	0,890	1,46E+01
1C	-0,459	1,36E+01
1C-07	-0,214	1,34E+01
1C-05	-0,465	1,29E+01
2C	-0,279	1,39E+01
2C-05	-0,187	1,38E+01
3C	-0,685	1,28E+01
3C-07	-0,710	1,28E+01
1C2007	-0,279	1,39E+01
3C2007	-0,685	1,28E+01
21A	-0,665	1,29E+01
22A	-0,339	1,36E+01
23A	-0,198	1,39E+01
24A	-0,162	1,37E+01
25A	-0,207	1,39E+01
1C2007	-0,214	1,34E+01
3C2007	-0,710	1,28E+01

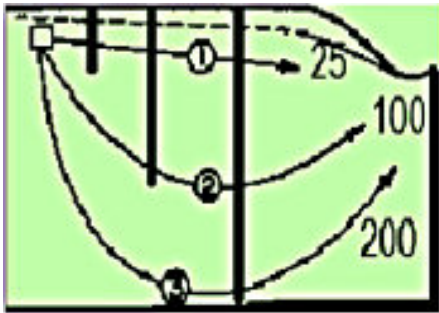


Fig. 31. Esquema de circulación de las aguas modificado de Swinnerton (1932) para ejemplificar distintos tiempos de residencia (en años) de las aguas subterráneas en cada línea de flujo (líneas curvas numeradas) intersectados por pozos (líneas verticales). La inyección de la mezcla de aguas producidas (MAP) debe seleccionar el tiempo requerido para garantizar la mezcla total para el umbral de sensibilidad ambiental requerido para tiempos de inyección constante o variable.

En este sentido, tal y como enunció Thraillkill (1968 (y también retomado por Back y Hanshaw, 1970), las lluvias cálidas de verano pueden provocar que las aguas que se infiltran naturalmente tengan una temperatura superior las del acuífero – como también es el caso de la inyección somera, vía por la cual ingresan artificialmente- por lo que en caso de que las aguas ingresen saturadas respecto a la calcita y se enfríen en un ambiente con dióxido de carbono disponible, se producirá un efecto de insaturación en el cual las aguas más frías aportan una fuente adicional para adquirir más CO₂ y, por ende, de disolver más calcita en el acuífero.

Efecto de mezcla

Las aguas meteóricas tienen una capacidad extraordinaria de disolución. Generalmente precipitan insaturadas de calcita y se infiltran muchas veces a través de un horizonte de suelo en cuya atmósfera los procesos biológicos incrementan la presión parcial de dióxido de carbono entre 10⁻² a 10⁻¹ atm (1-2 kPa); esto es, aquella parte de la presión total ejercida por la mezcla de gases que es atribuible al gas de interés. De este modo las aguas son ciertamente agresivas debido a que éste es el más soluble de los gases atmosféricos. Su solubilidad es proporcional a su presión parcial.

Bögli (1980) ha señalado que para la disolución del CO₂ en agua la Ley de Henry² puede escribirse como:

$$CO_{2(aq)} = C_{ab} \cdot P_{CO_2} \cdot 1,963$$

Donde CO₂ se expresa en gL⁻¹, P_{CO2} es la presión parcial de CO₂, 1,963 es el peso de 1 L de CO₂ en gramos a la presión de 1 atm y 20°C de temperatura y C_{ab} es un coeficiente de absorción dependiente de la temperatura.

En una atmósfera estándar y a nivel del mar, el valor medio global de P_{CO2} es de aproximadamente 0,038% o 0.00038 atm (380 ppm) o ligeramente mayor, lo que es equivalente a unos 0,6 mg CO₂ por litro de aire. La Tabla 15 (tomada de Bögli, 1980) resume un conjunto de valores para el coeficiente C_{ab}. La consiguiente formación de ácido carbónico, esencial para la disolución de la roca es, asimismo, favorecida por la presencia de ácidos orgánicos.

Tabla 13. Solubilidad del CO₂ (Bögli, 1980:46)

a) Coeficientes de absorción de CO ₂				
Temperatura de la disolución (°C)	0	10	20	30
Coeficiente de absorción C _{ab}	1,173	1,194	0.878	0.675
b) Solubilidad de equilibrio del CO ₂ (mg/L)				
Temperatura de la disolución (°C)	0	10	20	30
P _{CO2}				
0,0003	1.01	0,7	0,52	0,39
0,001	3,36	2,34	1,72	1,31
0,003	10.1	7,01	5,21	3,88
0,01	33,6	23,5	17,2	13,1
0,05	168	117	86	65,3
0,1	336	235	172	131
0,2	673	469	342	261

² Formulada en 1803 por William Henry establece que, a una temperatura constante, la cantidad de gas disuelta en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido.

De esta manera, las aguas de infiltración (meteóricas, no asociadas a corrientes fluviales o a arroyadas incluso) aunque pueden saturarse rápidamente también están expuestas al efecto de insaturación inducida por mezcla de aguas, el llamado “Efecto Bögli” o de “mezcla de aguas” (introducidos por Bögli en 1964) que establece que la mecánica de la mezcla en el sistema CO₂ de dos aguas cársicas de diferentes fuentes, ambas saturadas respecto a la calcita y trabajando independientes son incapaces de disolver más carbonatos pero la mezcla de ambas provocará una solución agresiva – mucho más si una de las aguas contiene algo menos de 250 mg/L de CaCO₃³.

Este efecto de mezcla de aguas, que puede graficarse del modo en que se presenta en las Figs. 32 y 33 y que torna las aguas de mezcla nuevamente agresivas, tiene una importancia notable en la conservación de las estructuras de conducción de la MAP y el desarrollo del cavernamiento. Back y Hanshaw (1970) acotaron que, aunque el efecto de mezcla pueda resultar en una insaturación significativa, tiende a ser totalmente inefectiva cuando la infiltración vadosa llegue sobresaturada respecto a la calcita o cuando en las aguas subterráneas receptoras la deposición de calcita no sea tan rápida como la degasificación de CO₂. La composición química inicial de las aguas meteóricas puede variar dependiendo del origen. En Cuba tienen una composición general del tipo de la Tabla 16 (Molerio, 2020b).

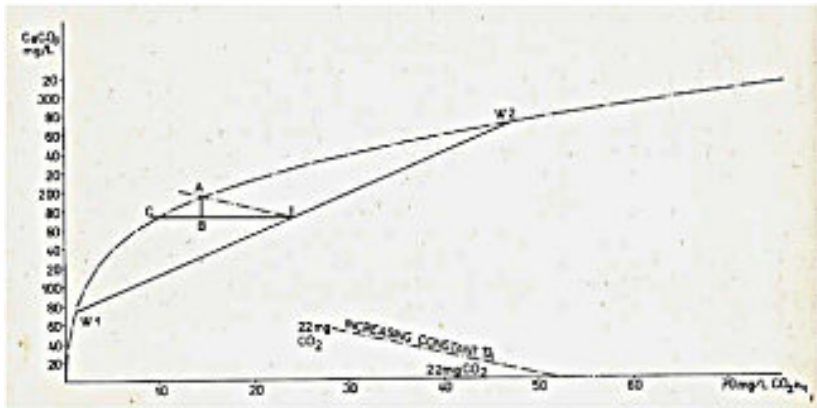


Fig. 32. Curva de efecto de mezcla (Bögli, 1960, 1965).

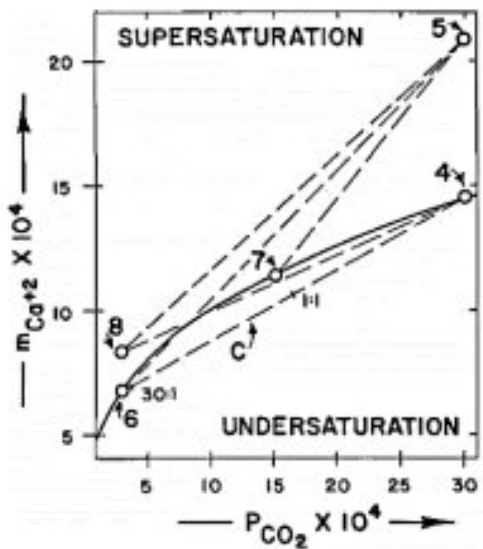


Fig. 33. Diagrama de saturación de calcita: mCa²⁺ (moles/litro) en función de la P_{CO2} de equilibrio (atm), según Thrailkill, 1968.

Tabla 14. Concentración estandarizada de macroconstituyentes (mEq/L) en los miembros terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba (TDS, Sólidos Totales Disueltos en mEq/L). Estos son los valores índice para construir el Nomograma de Schoeller-Molerio conservando el orden propuesto por Schoeller (ver bibliografía) y en los que se destaca el hecho de la influencia de los aerosoles marinos en la composición original de las aguas de lluvia del país.

Miembros terminales y de transición	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO ₄	HCO ₃	TDS	Posición en el sistema de flujo
Lluvia	0,048	0,026	0,078	0,077	0,050	0,065	0,048	Zona de recarga
Aguas superficiales	1,09	0,13	0,24	0,29	0,14	1,17	3,07	Zona de tránsito
Dulces Límite Inferior	1,23	0,66	2,03	2,95	0,57	5,08	12,52	
Dulces Límite Superior	2,46	1,62	13,47	29,03	9,42	7,36	63,36	
Aguas de mezcla	2,72	3,25	42,39	84,02	10,69	2,28	145,34	Zona de descarga
Agua de Mar	22,4	113,9	484,1	635,5	102,5	2,92	1361,50	
Aguas de Capa	1,17	8,63	934,46	902,43	38,66	129,97	2015,32	Fenómeno local

Tasa de flujo

La tasa de flujo es importante porque en momentos de aguas altas, v.gr. en verano, durante el período lluvioso, las aguas suelen estar insaturadas respecto a la calcita y a la dolomita. Pero este no es el caso de las aguas en el Yacimiento Canasí, donde las aguas muestreadas **siempre se han mostrado insaturadas o muy cercanas al equilibrio**. Conceptualmente, en época de aguas bajas, las aguas se saturan o sobresaturan, todo ello, en función del tiempo de tránsito de las aguas, esto es, en otros términos, del tiempo de contacto agua roca.

La tasa de flujo deviene un factor importante sobre todo para definir el alcance de la longitud de mezcla y, eventualmente, sobre el momento en que, a lo largo de una línea de flujo, se alcance la saturación respecto a la calcita y a dolomita y la MAP se torne inerte hasta que un nuevo proceso de mezcla de aguas provoque insaturación local. La Fig. 34 muestra el incremento de los niveles de saturación a ala calcita y a la dolomita a lo largo de la línea principal de flujo en el Yacimiento Canasí. Nótese que a todo lo largo de la línea de flujo las aguas permanecen insaturadas respecto a la calcita (RSC); no así respecto a la dolomita (RSD), cuya saturación y sobre saturación se alcanzan rápidamente. Las aguas subterráneas son susceptibles de ser agresivas a las calizas en el sistema acuífero durante todo su recorrido. Se trata, adicionalmente entonces, de un karst activo, en plena capacidad de desarrollo del cavernamiento en la zona saturada.

³ El mismo efecto se aplica en la mezcla de dos aguas de tipo H₂S provenientes de diferentes fuentes (Bögli, 1980:59)

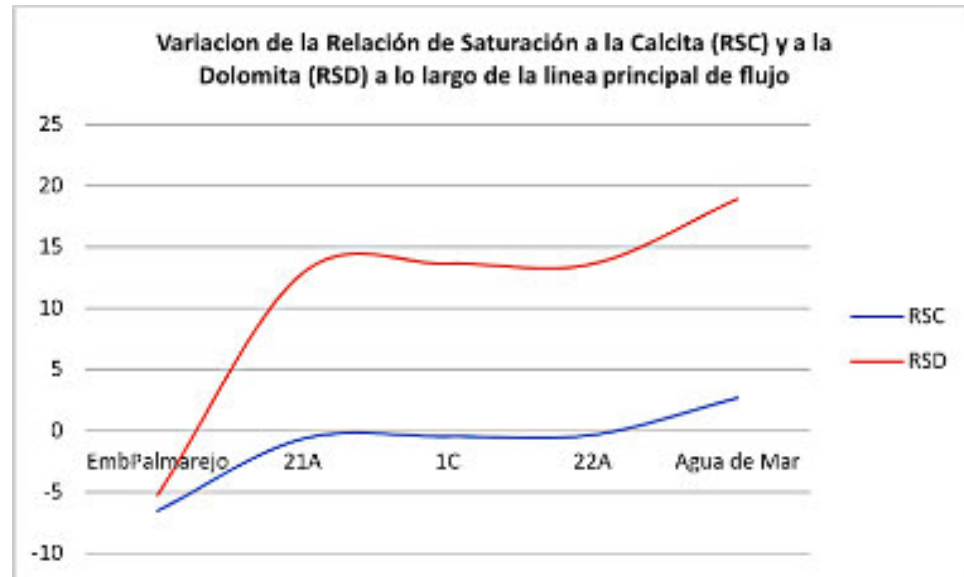


Fig. 34. Variación de la RSC y la RSD a lo largo de la línea principal de flujo en la plataforma de inyección de aguas someras en el Yacimiento Canasí.

El movimiento del agua subterránea se efectúa por diferencia de potencial de carga, que se define como la suma de la energía potencial gravitacional y la energía de presión. En virtud de la baja velocidad de las aguas, la energía cinética del flujo se desprecia. De esta manera, en un sistema arbitrario, con presión de 1 atm, elevación cero y velocidad cero, el potencial ϕ en cualquier punto del acuífero se define como:

$$\phi = gz + \frac{P}{\rho}$$

Donde g , es la aceleración de la gravedad; z , es la elevación sobre un plano de referencia; P , la presión y ρ , la densidad. El término carga total se relaciona con el potencial a partir de la expresión $\phi = gh$, donde h , es la carga hidráulica; v.gr., la altura del agua sobre el plano de referencia, generalmente el nivel del mar.

La velocidad no lineal (v_{nl}) promedio del agua a lo largo de la línea principal de flujo equivale a 0,513 m/d con $K=26$ m/día; $I=0.0007$, considerando la retención por almacenamiento ($n=0.069$) se obtiene de:

$$v_{nl} = \sqrt{\frac{KI}{n}}$$

La velocidad darciana (v_d) media de flujo en el sistema acuífero es del orden de los 0,0182 m/día, deducida a partir de:

$$v_d = KI$$

Y la velocidad no lineal (v_{nl}) sin retención equivale a 0,263 m/d.

La velocidad promedio en el sistema de flujo, deducida por trazadores se examina en el capítulo correspondiente. Los otros parámetros se resumen en la Tabla 17.

Tabla 15. Estructura del campo de propiedades físicas del acuífero en el área de la plataforma de inyección propuesta

Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Espesor acuífero	H	m	25
Cambio de potencial de carga	$\Delta h, h$	m	0.74
Ancho de la sección de cálculo	B	m	125
Gradiente hidráulico	I	Adimensional	0,0007 a 0.0044
Conductividad hidráulica darciana	K_D	m/día	26
Conductividad hidráulica turbulenta	K_t	m/día	2,4
Transmisividad darciana	T_D	m ² /día	1319
Transmisividad turbulenta	T_t	m ² /día	137
Almacenamiento	S	Adimensional	0,069
Caudal específico/capacidad de absorción	q	l/s/m	1 (1C), en el pozo de bombeo

CAPACIDAD DEL ACUÍFERO PARA LA ASIMILACIÓN DE CAUDALES DE INYECCIÓN

El esquema teórico general de los cambios en el nivel de las aguas subterráneas que ocurren en un pozo de inyección somera en un acuífero libre, del tipo del Yacimiento Canasí se muestra en la Fig. 37 La inyección puede hacerse libre; esto es, gravitacional o a presión. Normalmente la inyección gravitacional se emplea para situaciones en que la capacidad de absorción es pequeña; en tanto la inyección a cierta presión suele aplicarse en sistemas de recarga que aceptan grandes cantidades de agua. Un esquema de distribución de pozos de inyección se muestra en la Figs. 38-40.

Los resultados del ensayo de caudal muestran que la capacidad de absorción del sistema, con una elevación de la carga de inyección (aumento del potencial hidráulico) de 4 m, en régimen permanente puede llegar hasta un máximo de 16 lps estabilizado. Por tal motivo, para la etapa de anteproyecto y proyecto técnico-ejecutivo se pretende combinar el sistema de pozos con uno de balsas de recarga, aprovechando la alta permeabilidad de la zona de aereación (vadosa, no saturada) del acuífero en la zona propuesta para la plataforma de inyección.

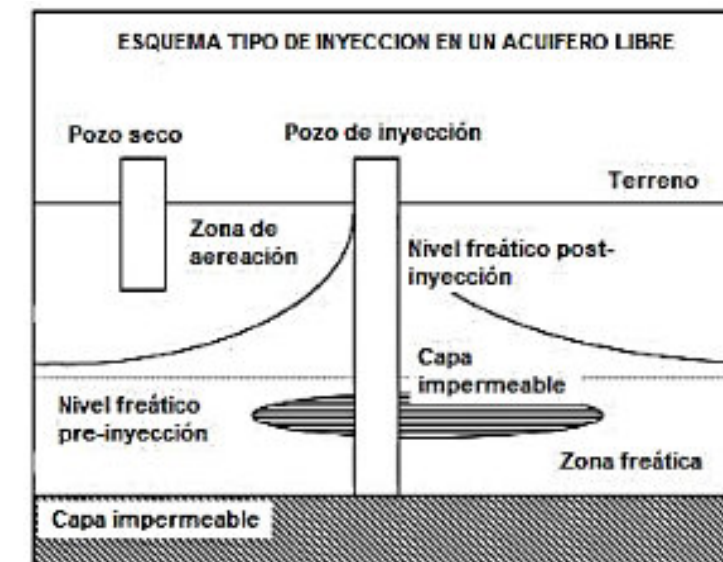
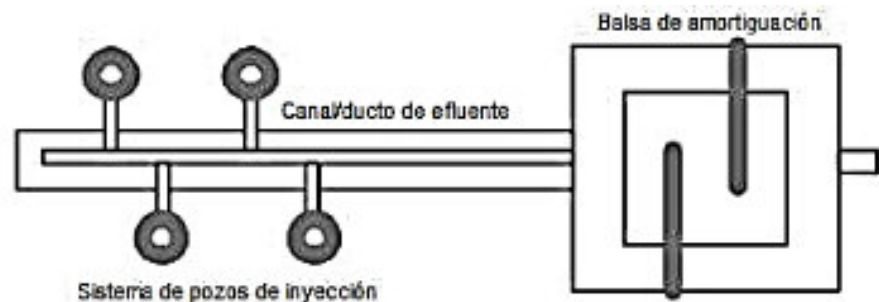


Fig. 35. Esquema tipo de inyección de aguas en un acuífero libre.



El estimado de diseño del sistema combinado parte de la expresión siguiente para un cono de impresión con radio en la base de 5 m en un acuífero confinado de 50 m de espesor se basa en la expresión:

$$S_w = \frac{Q}{2\pi K b} \log_e \frac{2x_0 - r_w}{r_w^2} \approx \frac{Q}{2\pi K b} \log_e \frac{2x_0}{r_w}$$

Descontando los efectos de retardo de flujo y convirtiendo para un acuífero libre, el caudal inicial de inyección en un pozo unitario de diámetro 0,5 m sería de aproximadamente 5 lps en régimen instantáneo.

HIDROLOGÍA DE TRAZADORES: ENSAYOS CON TRAZADORES AMBIENTALES

Para identificar los tipos de agua y sus relaciones mutuas, la reposición natural del acuífero y el tiempo de residencia de las aguas se aplicaron técnicas isotópicas basadas en la respuesta natural del tritio (^3H) y del Radón-222 (^{222}Rn).

El tritio (^3H) es un isótopo radioactivo del hidrógeno (H) que se desintegra formando ^3He por emisión de partículas beta y tiene un período de semidesintegración de 12,33 años. El tritio producido en la atmósfera, ya sea de forma natural o artificial, pasa a formar parte de la molécula de agua y posteriormente se incorpora al ciclo hidrológico, donde se comporta como un trazador del movimiento del agua. Las explosiones termonucleares realizadas al principio de la década de 1960 inyectaron a la atmósfera grandes cantidades de tritio, las cuales sobrepasaron con creces las concentraciones naturales (Herrera et al., 2004).

El radón (^{222}Rn) es un gas radiactivo inerte emanado constantemente de los suelos, rocas y aguas subterráneas, lo cual se debe a la desintegración alfa del radio (^{226}Ra). La radiactividad, la inercia y la naturaleza gaseosa del radón lo convierten en un indicador ambiental significativo para el análisis de algunos problemas hidrogeológicos que implican interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas. El radón es producto de la desintegración del radio (^{226}Ra), elemento altamente radiactivo, así como del torio de donde viene el nombre de uno de sus isótopos, torón, de vida media de 55 segundos y de número másico 220. El isótopo ^{219}Rn es producto de la desintegración del actinio, llamado Actinón y tiene una vida media de 4 segundos. Además de todos éstos, el radón tiene 22 isótopos artificiales, producidos por reacciones nucleares por transmutación artificial en ciclotrones y aceleradores lineales. El isótopo más estable es el ^{222}Rn , también el más abundante, con una vida media de 3,8 días y producto de la desintegración del ^{226}Ra . Al emitir partículas alfa se convierte en ^{218}Po . El ^{222}Rn (en lo adelante Radón), tiene un tiempo medio de vida de 3,824 días.

Modelos de flujo

Dos modelos extremos y sus combinaciones describen básicamente la circulación de agua en los sistemas hidrológicos: el modelo agrupado (lumped) y el modelo exponencial. Por lo común, ambos modelos se combinan.

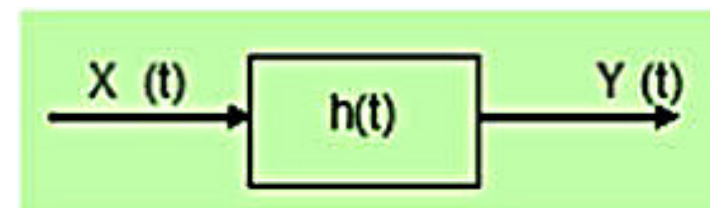
Como premisa básica, en las aplicaciones de hidrología de trazadores se considera (Leibundgut et al. 2009) que:

- Se trata de un sistema cerrado

- Se considera suficientemente homogéneo
- La circulación se efectúa en régimen permanente
- El sistema tiene un área de entrada (ingreso, input, recarga) definida
- El sistema tiene uno o varios puntos de salida (descarga, output, egreso) mediante manantiales, pozos o ríos que lo drenan

Los sistemas hidrológicos pueden describirse a partir de los elementos físicos que constituyen aquellos espacios que retardan, limitan, cierran o permiten el movimiento de los fluidos por un intercambio de masas de porosidad única, doble-porosidad, o múltiple porosidad en que los espacios que integran el sistema y permiten la circulación y almacenamiento de los fluidos. Molerio (1985) los ha resumido en la Tabla 19.

En muchas ocasiones se desconoce con detalle la estructura geométrica del sistema y la primera aproximación a la solución del transporte de masas se resuelve mediante **modelos agrupados** (lumped), que son modelos de caja negra que se expresan generalmente por el esquema:



Bajo ese esquema pueden resolverse los siguientes grupos de problemas:

Conociendo:	Encontrar:	Tipo de Problema
X (t), h (t)	Y (t)	Predicción (directo)
Y (t), h (t)	X (t)	Detección
X (t), Y (t)	h (t)	Identificación (inverso)
	h (t)	Especificación (selección)
las funciones X (t)		
Y (t)		
h (t)		
pueden ser:	determinísticas	en: el mundo real el modelo conceptual adoptado el modelo matemático adoptado
	estocásticas	
	mixtas, y/o lineales	
	no lineales	
Tipos de modelos: Icónicos	Naturales	
Analógicos	Físicos	
	Conceptuales	
Matemáticos	Heurísticos	
	Estadísticos	

Tabla 16. Espacios constitutivos del sistema cársico (según Molerio, 1985a).

CATEGORÍAS				DENOMINACIÓN DEL ESPACIO	VOLUMEN CON RELACIÓN AL SISTEMA	LONGITUD CARAC-TERÍSTICA	RÉGIMEN DE FLUJO	DIÁMETRO
E S P A C I O	M A C R O D I S C O N T I N U I D A D E S	E S P A C I O	A G R I E T A D O	1. Cavernas	$V \leq 1\%$	km.	No lineal de alta velocidad	m
				2. Grietas discontinuidades y en general (macrofracturas):	$1\% \leq V \leq 5\%$	km.	No lineal de alta velocidad	mm - m
				- Fallas		km.	Lineal	m
				- Diaclasas.		km.	Lineal	mm-cm
				- Planos de estratificación.		km.	Lineal	cm
				- Planos de esquistosidad.		cm	Lineal	mm
	M I C R O D I S C O N T I N U I D A D E S	E S P A C I O	C A R S I C O	3. Poros de la matriz rocosa (microfracturas):	$5\% < V \leq 40\%$	mm	No lineal de baja velocidad (microflujo)	$\leq 0,1$ mm
				- Exfoliación		mm		0,1 mm
				- Esquistosidad		mm		10 μ
				- Clivaje		mm		0,1 μ
				4. Matriz sólida	$V > 40\%$		No lineal de baja velocidad (no flujo)	< 1 mm

Cada parámetro agrupado se caracteriza por su propia función de distribución del tiempo de tránsito. Como señalan Leibundgut et al. (2009), tal función debe ser conocida o se asume sobre la base de información hidrológica del sistema. En muchos casos, las funciones de distribución del tiempo de tránsito tienen uno o dos parámetros cuyos valores deben

estimarse calibrando el modelo con los datos experimentales que se observan a la salida del sistema (en el sector o punto considerado de salida). La concentración de entrada se mide directamente o se calcula a partir de la data hidrológica.

Definición de los patrones de circulación

La data derivada de la red de monitoreo CESIGMA-CPHR (Fig. 41) para el movimiento del Radón y del Tritio en el Yacimiento de referencia muestra un complejo espectro de circulación de las aguas en los que, dependiendo de la intensidad de los factores de forzamiento; la lluvia en este caso, muestra modelos de flujo a pistón (que pueden ser aproximados en su solución por modelos agrupados) como modelos superpuestos (también de flujo a pistón) pero que parecen enlazar niveles de múltiple porosidad asociados. Las Figs. 42-47 muestran los diferentes tiempos de retardo en la respuesta de los trazadores ambientales naturales a láminas de lluvia (input conocido) de diferente altura e intensidad en el período de monitoreo.

Transporte de Radón 222

La aplicación de Radón 222 para distinguir las relaciones hidráulicas entre distintos cuerpos de agua está abundantemente reportada en la literatura. Particularmente en el caso de las relaciones entre aguas con diferente mineralización se encuentran estudios de caso que avalan la fortaleza del Radón 222 como trazador natural para cuantificar estas relaciones (Salih, 2003; Guiseppe, 2006; Kluge, 2007; Schubert et al., 2007; Al-Hilal, 2016, 2020; El-Sharkawy, A. y Al-Ghamdi, 2018; Najkasone et al., 2021). En Cuba, el ²²²Rn se ha aplicado como trazador natural para identificar, en acuíferos cársicos costeros, la contaminación por hidrocarburos y el movimiento de la intrusión marina (Molerio, 2002, 2003, 2006, 2007; Molerio, Fernández y Carrazana, 2021a, 2012b). Molerio (2002) y Carrazana et al. (2010) publicaron las primeras mediciones de radón en la atmósfera de cuevas turísticas cubanas. Del mismo modo, el ²²²Rn se aplica para definir tiempos de tránsito de las aguas subterráneas (Burnett, W.C., Dulaiova, H. (2003); Cook et al, 2008; Genereux et al, 1993; Kluge et al., 2007)

La detección y la aclaración inequívoca de la distribución de la contaminación en las aguas subterráneas por cualquier tipo de LFNA (Líquidos de Fase No Acuosa) y su cuantificación, ya sean ligeros (los llamados LLFNA, alcoholes, gasolina o nafta) o densos (DLFNA, como fuels, petróleo y aceites) puede lograrse exitosamente aprovechando las propiedades de partición agua-hidrocarburos de isótopos radioactivos ambientales como el Radón (²²²Rn). En los últimos años, al mejorarse las técnicas de detección y cuantificación (Surbeck 1996; Burnett et al, 1998) este radionucleido se ha usado con frecuencia por su extraordinaria capacidad para resaltar la contaminación por diferentes tipos de hidrocarburos en las aguas subterráneas (Hunkeler et al, 1997; Hunkeler, Höhener y Seller, 1997; Werner y Hohener, 2002a, 2002b; Molerio, 2003, 2006a, 2007a, 2007b).

El isótopo radioactivo ²²²Rn, con un tiempo medio de vida de 3,8 días es uno de los productos de la desintegración radioactiva natural del Uranio 238. La desintegración α del Radio 226 (²²⁶Ra) produce ²²²Rn que se desintegra en productos de muy corta vida. Al tratarse de un gas noble, el ²²²Rn es químicamente inerte. Sin embargo, el ²²²Rn particiona en líquidos orgánicos y, desde superficies de minerales que contienen ²²⁶Ra, como en la mayor parte de los acuíferos, el ²²²Rn emana hacia las fases gaseosa o líquida contiguas por retroceso o difusión.

Por esa razón, las aguas superficiales casi no contienen ²²²Rn, ya que se evapora e incorpora a la atmósfera; pero las aguas subterráneas lo adquieren ya que la concentración de actividad del ²²²Rn desde la zona de recarga a la zona saturada, se incrementa hasta alcanzar un estado de equilibrio entre la emisión y la desintegración radioactiva. El tiempo para que ese régimen permanente se establezca es de unas 5 vidas medias. Tales propiedades hacen que el ²²²Rn esté presente en actividad constante en la mayor parte de los acuíferos y que se transporte, sin el menor retardo, en aguas que no estén contaminadas por LFNAs. Por ello, tienen un valor inestimable en la determinación de contaminaciones de este tipo.

La fundamentación teórica del modelo hidrológico isotópico parte de los siguientes principios básicos:

- La distribución promedio del ^{226}Ra , el radionúclido padre del ^{222}Rn , en la fase sólida es homogénea a escala macroscópica.
- La porosidad del material acuífero es constante en la zona de flujo ensayada.
- Las pérdidas de ^{222}Rn desde la zona saturada del acuífero a la zona no saturada, son despreciables.
- La partición del ^{222}Rn entre el LFNA y la fase acuosa está en equilibrio.
- El coeficiente de partición es independiente de la saturación de LFNA.
- La fase LFNA está inmóvil – o lo que es lo mismo, se mueve más lentamente que el agua subterránea-.
- La porción de ^{222}Rn en la matriz sólida puede despreciarse.

Ello significa que cuando el agua subterránea que contiene ^{222}Rn es estado de equilibrio de emisión-desintegración migra hacia una zona contaminada por LFNA se produce un decrecimiento en la actividad del ^{222}Rn debido a la partición del ^{222}Rn entre el agua y el LFNA. Cuando las aguas subterráneas abandonan la zona contaminada, la actividad del ^{222}Rn en la fase agua debe retornar al valor inicial del equilibrio.

La ecuación general de transporte es análoga a la de van Genuchten y Alves, de manera que:

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-S)QA + QA^{NAPL}] = -\frac{\partial}{\partial x}\left[qA - (1-S)D\frac{\partial A}{\partial x}\right] + (1-\theta)\rho P\lambda - [(1-S)QA + QA^{NAPL}]\lambda$$

donde t, es el tiempo; x, es la distancia de flujo; S es la saturación de Líquidos de Fase No-Acuosa (NAPL) en el volumen poroso; θ , es la porosidad; A, es la actividad de ^{222}Rn en la fase agua en la locación x y en el momento t; A^{NAPL} es la actividad de ^{222}Rn en la fase NAPL en la locación x y en el momento t; q, es la descarga específica de las aguas subterráneas; D, es el coeficiente de dispersión del ^{222}Rn en las aguas subterráneas; θ , es la densidad del material acuífero; P, es la tasa de emisión de ^{222}Rn desde la superficie mineral por masa de material acuífero seco, y λ es la constante de desintegración radioactiva del ^{222}Rn .

La partición del ^{222}Rn se describe mediante:

$$A^{NAPL} = KA$$

donde K es el coeficiente de partición del ^{222}Rn . Después de algunas transformaciones se llega a que la relación entre la emisión y la desintegración de la actividad del ^{222}Rn en la zona no contaminada de las unidades hidrogeológicas ($S=0$) respecto a aquella contaminada ($S\theta$) es el Factor de Retardo (R), que se expresa como:

$$R = \frac{A_c^{S=0}}{A_c^{S\theta}} = 1 + S * K$$

donde S, es la saturación de NAPLs, K es el coeficiente de partición del NAPL en agua para el ^{222}Rn .

Ello significa que cuando el agua subterránea que contiene ^{222}Rn es estado de equilibrio de emisión-desintegración migra hacia una zona contaminada por NAPLs se produce un decrecimiento en la actividad del ^{222}Rn debido a la partición del ^{222}Rn entre el agua y el NAPL. Cuando las aguas subterráneas abandonan la zona contaminada, la actividad del ^{222}Rn en la fase agua debe retornar al valor inicial del equilibrio.

El modelo teórico adoptado para cuantificar la migración del ^{222}Rn y su eficacia en la cuantificación de la contaminación por NAPLs es válido por cuanto se cumplen todos los requisitos que se derivan de la ecuación de transporte de Van Genuchten y Alves, a saber:

- Se conoce el coeficiente K.

- Se conoce A_e .
- Las determinaciones de tritio confirmaron que las aguas muestreadas tienen un tiempo medio de residencia superior a un mínimo de siete días (como confirman tanto los modelos hidráulicos adoptados –Dupuit-Forcheimer-Liakopoulos- como el modelo isotópico para el transporte de tritio –Molerio, 2004, 2006b, 2007c).
- Los pozos monitoreados que mostraron disminución en la actividad de ^{222}Rn están cerca o en la zona contaminada. Aguas abajo, cualquier determinación de ^{222}Rn puede subestimar la saturación de NAPLs en las aguas subterráneas.

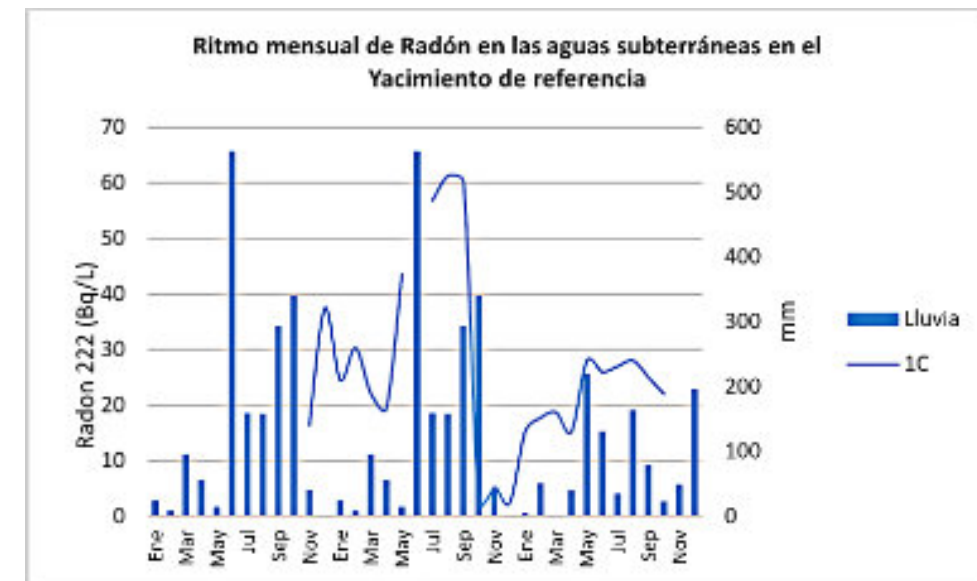


Fig. 36. Ritmo mensual de Radón y lluvia en las aguas subterráneas monitoreadas en la cala 1C del Yacimiento de referencia.

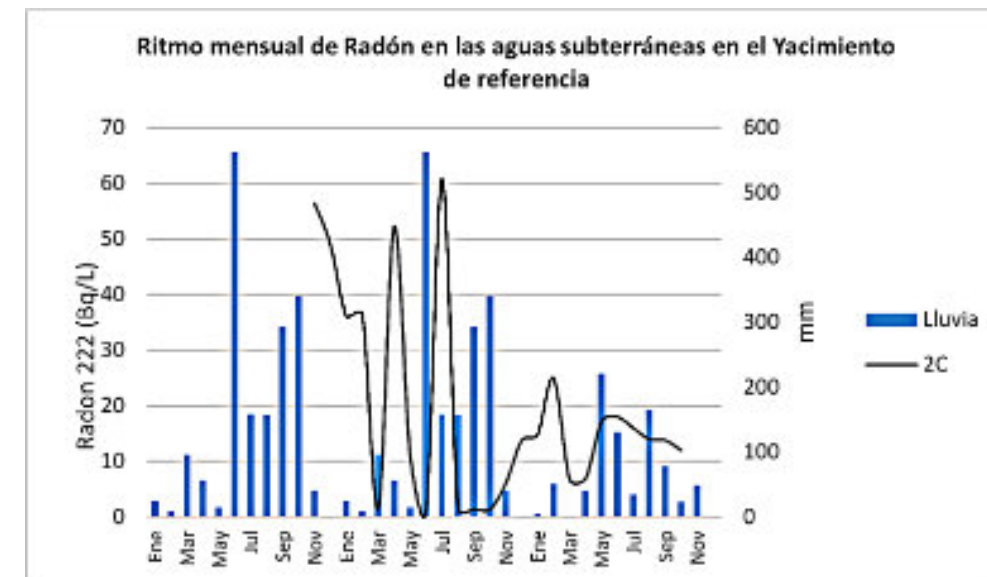


Fig. 37. Ritmo mensual de Radón y lluvia en las aguas subterráneas monitoreadas en la cala 2C del Yacimiento de referencia.

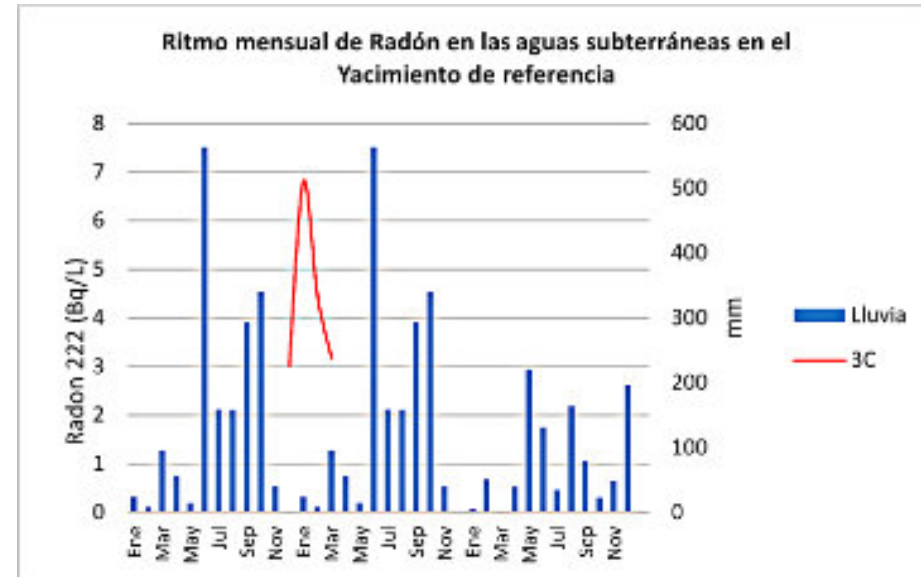


Fig. 38. Ritmo mensual de Radón y lluvia en las aguas subterráneas monitoreadas en la cala 3C del Yacimiento de referencia.

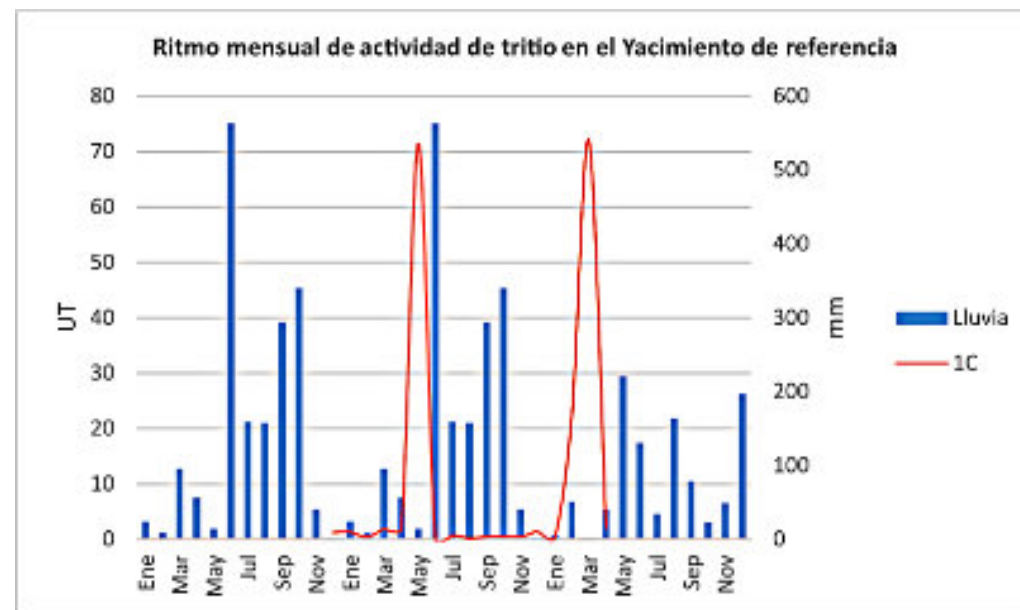


Fig. 39. Ritmo mensual de tritio y lluvia en las aguas subterráneas monitoreadas en la cala 1C del Yacimiento de referencia.

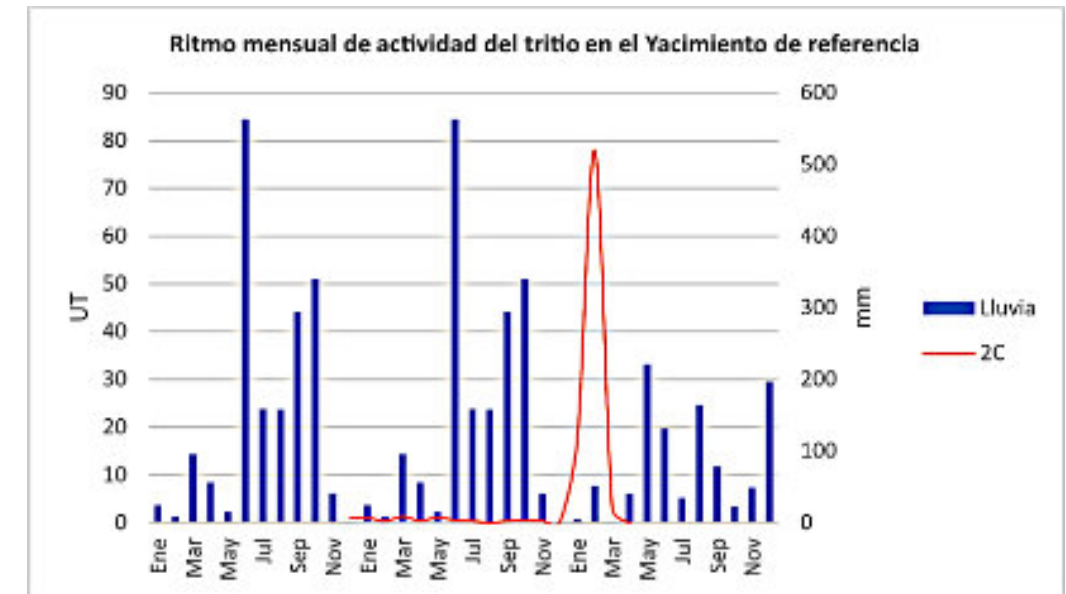


Fig. 40. Ritmo mensual de tritio y lluvia en las aguas subterráneas monitoreadas en la cala 2C del Yacimiento Canasí.

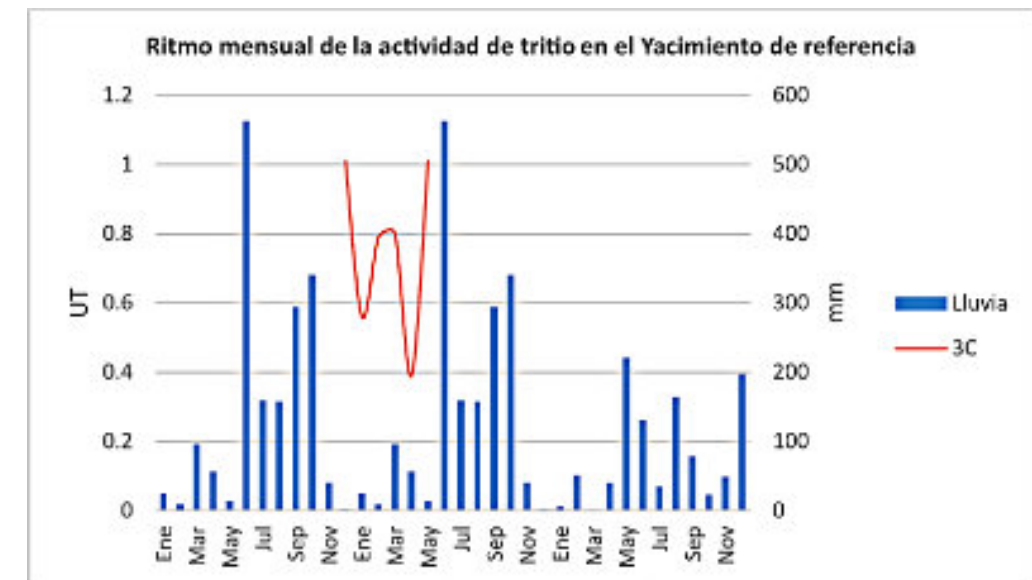


Fig. 41. Ritmo mensual de tritio y lluvia en las aguas subterráneas monitoreadas en la cala 3C del Yacimiento Canasí.

Transporte de Tritio

La concentración de tritio en las aguas de infiltración para cada estación húmeda fue tomada como equivalente a la concentración media ponderada de ^3H en la lluvia. La componente antigua se toma con una concentración aproximadamente constante durante los últimos años. De este modo, asumiendo un modelo de mezcla simple para cada pozo de bombeo, se obtiene que,

$$p = \frac{[(C_{out})_s - (C_{in})_s]}{[(C_{old}) - (C_{in})_s]}$$

donde p es la proporción de componente antigua en el pozo de bombeo durante los meses de verano. C_{old} y (C_{out})_s son las concentraciones medias de tritio en invierno y en verano, respectivamente. (C_{in})_s es la concentración media ponderada de tritio en las aguas de lluvia durante el verano.

Para la interpretación de los datos de isótopos ambientales se emplean modelos de caja negra o del tipo de parámetros aglutinados. Todos ellos se basan en la forma que se asume para la función de distribución del tiempo de tránsito, que es la función de ponderación. Tal función describe el tiempo de tránsito del trazador entre la entrada y la salida del sistema. En la mayor parte de los casos se emplea el modelo de dispersión (DM) o el exponencial (EM) y ambas poseen el mismo parámetro de ajuste: el tiempo medio de tránsito del agua o del trazador en dependencia del tipo de acuífero que se considere.

En los acuíferos agrietados, parte del agua se concentra inmóvil en la matriz microporosa y se considera estática, mientras que otra parte fluye directamente por las grietas (agua móvil). El trazador se difunde entre las dos fases, la móvil y la estática, lo que provoca un cierto retardo en el transporte del trazador en comparación con el flujo en el agua móvil. Una vez que el trazador dispone de tiempo suficiente para penetrar toda la matriz microporosa, el transporte puede considerarse similar al que ocurre en un medio poroso (utilizando modelos de caja negra).

No obstante, en tal caso, el modelo matemático suministra el tiempo de tránsito del trazador; éste es R_p veces mayor que el tiempo medio de tránsito del agua t_w. El parámetro t_t equivale a la relación entre el volumen total de agua en el sistema V, y la tasa de flujo volumétrico Q, a través del sistema.

El volumen de agua móvil (V_m), igual a la relación V/R_p, requiere del conocimiento del factor de retardo R_p que, a su vez, representa la relación entre la porosidad total n_t, y la porosidad de fisuras, n_f. En el área considerada para el modelo, ambas porosidades se asumieron, respectivamente, del 40 y el 5%, lo que resulta en un valor R_p=8.

Al aplicar el modelo de dispersión (DM) se requiere de un parámetro adicional de ajuste; éste es el llamado parámetro de dispersión (D/v_x)*. En sistemas de doble porosidad, del tipo grieta-poro, el parámetro (D/v_x) describe la variación de los tiempos de tránsito del trazador a través de las grietas y resulta de la dispersión en las fisuras (o su distribución) y de la difusión entre el agua móvil y la estática. En todas las unidades acuíferas se aplicó el modelo de dispersión (DM) para determinar los tiempos de tránsito del tritio a través del acuífero.

En condiciones de régimen permanente, la relación entre las concentraciones de entrada, C_{in(t)} y salida C_{out(t)} del trazador en el sistema hidrogeológico, se describen mediante la integral de convolución:

$$C_{out}(t) = \int C_{in}(t - \tau) g(\tau) \exp(-\lambda t) d\tau$$

en la que λ es la constante de decaimiento radioactivo para el tritio (cero para isótopos estables) y g(τ) es la función de ponderación que, en el modelo de dispersión, se define como:

$$g(\tau) = \{Pd / 4\pi / tt\} 0.5 \exp[-Pd(1 - \tau / tt)^2 / (4\tau / tt)] / \tau$$

donde tt es el tiempo medio de tránsito del trazador y Pd es 1/(D/v_x)*.

La función de entrada se calcula según la expresión siguiente:

$$C = [\alpha \sum (PiCi)_s + \sum (PiCi)_w] / [\alpha \sum (Pi)_s + \sum (Pi)_w]$$

en la que Pi y Ci son, respectivamente, la lámina de lluvia y el contenido de tritio en ésta, en el i-ésimo mes del año en consideración. Empleando esta ecuación se calculó la función de entrada de ³H sobre la base de datos medidos directamente en el sistema acuífero, en tanto para años anteriores se correlacionaron con los datos de la estación OIEA-OMM del Instituto de Ciencias Marinas de Miami, Estados Unidos. La tasa de infiltración θ se tomó igual a la unidad.

La modelación se llevó a cabo solamente para los datos de tritio a fin de obtener información acerca del tiempo medio de tránsito de la componente más antigua en el sistema acuífero (horizonte inferior). En todos los casos, el tiempo medio de tránsito supera los cinco tiempos medios de vida del Radón y justifica, por tanto, la aplicación de este como trazador de partición para determinar la contaminación por NAPLs.

Evaluación del tiempo de tránsito de las aguas

El tiempo de tránsito o de residencia de las aguas se evalúa a partir del siguiente modelo analítico

$$A(t) = A_e \left(1 - e^{-\frac{t}{t_t}} \right)$$

En la que,

A(t), es la actividad del isótopo en las aguas subterráneas en el instante t

A_e, es la actividad de isótopo en equilibrio

λ, es la constante de decaimiento del isótopo (0,1813/día para el ²²²Rn y para el ³H

De donde se deriva que los tiempos de residencia se computan mediante:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{A_e}{A_e - A_t} \right) \text{ o, lo que es lo mismo,}$$

$$t_{res} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{A_e - A_0}{A_e - A_t} \right)$$

Donde,

A_e, es la actividad del isótopo en equilibrio (punto situado a suficiente distancia de las estaciones de medición)

A₀, actividad en el instante t₀

Las variables respuestas naturales obtenidas en el sistema obligan a considerar muy cuidadosamente el estimado de los tiempos de tránsito. La Fig. 48 por ejemplo, muestra la respuesta de tritio ante láminas superiores a los 70 mm de lluvia en la estación 1C (en el polígono propuesto). La Tabla 20 muestra, para la variada gama de conductividades hidráulicas en pozos y en afloramientos, el amplio espectro de tiempos de residencia que pueden esperarse en el Yacimiento en general y el polígono propuesto, en particular.

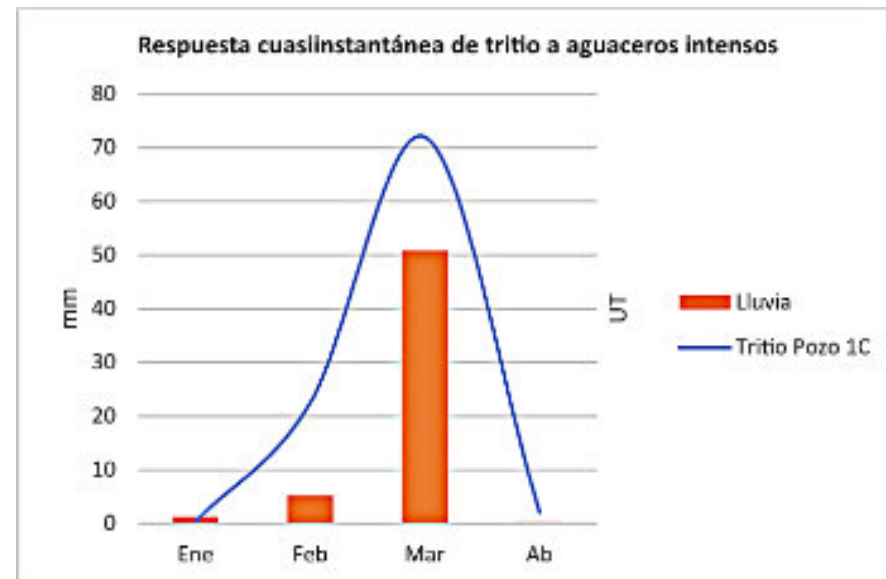


Fig. 42. Comportamiento del transporte de tritio en respuesta a una lámina de lluvia acumulada de 70 mm en el pozo 1C.

Tabla 17. Cálculos de tiempo de tránsito por métodos hidráulicos asumiendo velocidad darciana ($v=KI$).

Cálculos de tiempo de tránsito por métodos hidráulicos asumiendo velocidad darciana ($v=KI$)					
K m/d	I	v m/d	L	TRES días	TRES años
5	0,0007	0,004	124	35428,6	97,1
10	0,0007	0,007	125	17857,1	48,9
20	0,0007	0,014	125	8928,6	24,5
30	0,0007	0,021	125	5952,4	16,3
40	0,0007	0,028	125	4464,3	12,2
50	0,0007	0,035	125	3571,4	9,8

CONCLUSIONES

La mezcla de las aguas producidas, con las del acuífero provocará insaturación de la solución y un incremento de sus propiedades corrosivas. Otro tanto ocurrirá en la mezcla con las aguas de mar. Para ello, es necesario tener en cuenta el modo en que influyen la heterogeneidad y la anisotropía del sistema acuífero. En cualquier punto del acuífero, la anisotropía representa la variación de la conductividad hidráulica con la dirección y se diferencia de la heterogeneidad, que se refiere a la variación de un punto a otro (Palmer, 1999). La presencia de cavernas en el dominio de flujo de la inyección somera es la principal causa de la heterogeneidad y anisotropía a lo largo de la línea de flujo seleccionada para aplicar la tecnología.

La corrosión o incrustación por agua está asociada a la concentración de CO_2 libre, el cual influye en el comportamiento del carbonato de calcio ($CaCO_3$). Un agua en equilibrio químico mantiene la concentración adecuada de CO_2 de tal forma que no se remueve la película de $CaCO_3$ que protege a los materiales de la corrosión, ni se precipita $CaCO_3$. Los resultados muestran que las aguas subterráneas se encuentran aguas insaturadas, con tendencia a ser agresivas en casi todos los casos.

En el informe anterior se señaló que es especialmente importante definir el efecto de la conducción, convección, evaporación, condensación en los conductos cárnicos, la tasa de flujo y la radiación en los aportes y los flujos superficiales y subterráneos y la mezcla entre ambos. El papel de conductos saturados completamente no se conoce y es tema de

investigación que, en este reporte, se ha examinado con más detalle en cuanto concierne al efecto sobre la insaturación de las soluciones carbonatadas que discurren por el acuífero y su capacidad para insaturarse y convertirse nuevamente en aguas agresivas. En este sentido, tal y como enunció Thraikill (1968 (y también retomado por Back y Hanshaw, 1970), las lluvias cálidas de verano pueden provocar que las aguas que se infiltren naturalmente tengan una temperatura superior las del acuífero –como también es el caso de la inyección somera, vía por la cual ingresan artificialmente- por lo que en caso de que las aguas ingresen saturadas respecto a la calcita y se enfríen en un ambiente con dióxido de carbono disponible, se producirá un efecto de insaturación en el cual las aguas más frías aportan una fuente adicional para adquirir más CO_2 y, por ende, de disolver más calcita en el acuífero.

La tasa de flujo es importante porque en momentos de aguas altas, v.gr. en verano, durante el período lluvioso, las aguas suelen estar insaturadas respecto a la calcita y a la dolomita. Pero este no es el caso de las aguas en el Yacimiento Canasí, donde las aguas muestreadas siempre se han mostrado insaturadas o muy cercanas al equilibrio. Conceptualmente, en época de aguas bajas, las aguas se saturan o sobresaturan, todo ello, en función del tiempo de tránsito de las aguas, esto es, en otros términos, del tiempo de contacto agua roca.

La tasa de flujo deviene un factor importante sobre todo para definir el alcance de la longitud de mezcla y, eventualmente, sobre el momento en que, a lo largo de una línea de flujo, se alcance la saturación respecto a la calcita y a dolomita y la MAP se torne inerte hasta que un nuevo proceso de mezcla de aguas provoque insaturación local. La Fig. muestra el incremento de los niveles de saturación a la calcita y a la dolomita a lo largo de la línea principal de flujo en el Yacimiento Canasí. Nótese que a todo lo largo de la línea de flujo las aguas permanecen insaturadas respecto a la calcita (RSC); no así respecto a la dolomita (RSD), cuya saturación y sobre saturación se alcanzan rápidamente. Las aguas subterráneas son susceptibles de ser agresivas a las calizas en el sistema acuífero durante todo su recorrido. Se trata, adicionalmente entonces, de un karst activo, en plena capacidad de desarrollo del cavernamiento en la zona saturada.

La velocidad no lineal (v_{nl}) promedio del agua a lo largo de la línea principal de flujo equivale a 0,513 m/d con $K=26$ m/día; $I=0.0007$, considerando la retención por almacenamiento ($n=0,069$). La velocidad darciana (v_d) media de flujo en el sistema acuífero es del orden de los 0,0182 m/día, y la velocidad no lineal (v_{nl}) sin retención equivale a 0,263 m/d.

La aceptabilidad ambiental del acuífero cársico salinizado de aguas de alta temperatura es uno de los elementos básicos para fundamentar el proyecto de inyección somera de aguas de capa tratadas (Molerio, 2015). Los resultados obtenidos, aunque susceptibles de ser refinados aún más, son suficientemente rigurosos y satisfactorios para justificar el proyecto. La forma en que ello afecta la movilidad de los componentes (macro, y microelementos) no afecta sustancialmente el cuadro ambiental general. Pero desde el punto de vista teórico, se trabaja en la modelación de la zona de influencia cercana; es decir, en los 12 metros alrededor del punto de inyección.

Los resultados del ensayo de caudal detalladamente descritos en el informe anterior (Molerio, Martínez y Sardiñas, 2021) muestran que la capacidad de absorción del sistema, con una elevación de la carga de inyección (aumento del potencial hidráulico) de 4 m, en régimen permanente puede llegar hasta un máximo de 16 lps estabilizado. Por tal motivo, para la etapa de anteproyecto y proyecto técnico-ejecutivo se pretende combinar el sistema de pozos con uno de balsas de recarga, aprovechando la alta permeabilidad de la zona de aereación (vadosa, no saturada) del acuífero en la zona propuesta para la plataforma de inyección.

Descontando los efectos de retardo de flujo y convirtiendo para un acuífero libre, el caudal inicial de inyección en un pozo unitario de diámetro 0,5 m sería de aproximadamente 5 lps en régimen instantáneo. Esta será la base de cálculo para el anteproyecto y proyecto técnico ejecutivo.

La data derivada de la red de monitoreo CESIGMA-CPHR para el movimiento del Radón y del Tritio en el Yacimiento Canasí muestra un complejo espectro de circulación de las aguas en los que, dependiendo de la intensidad de los factores de forzamiento; la lluvia en este caso, muestra modelos de flujo a pistón (que pueden ser aproximados en su solución por

modelos agrupados) como modelos superpuestos (también de flujo a pistón) pero que parecen enlazar niveles de múltiple porosidad asociados.

La modelación se llevó a cabo solamente para los datos de tritio a fin de obtener información acerca del tiempo medio de tránsito de la componente más antigua en el sistema acuífero (horizonte inferior). En todos los casos, el tiempo medio de tránsito supera los cinco tiempos medios de vida del Radón y justifica, por tanto, la aplicación de este como trazador de partición para determinar la contaminación por NAPLs.

El diseño definitivo de la construcción del sistema de pozos de inyección dependerá del resultado del anteproyecto y proyecto técnico ejecutivo, que será desarrollado en coordinación con el proyecto de la planta de tratamiento. Los resultados hasta ahora obtenidos en los estudios sustentan la posibilidad de emprender la ejecución de un proyecto mixto canal-balsa de recarga-pozo de infiltración.

REFERENCIAS

Abelló, I., P. Luaces, J.R. Fagundo-Castillo, J. Güerón (1993): **Estudio estadístico multivariado sobre datos de diferentes litologías de la cuenca del río San Marcos, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba.** Libro de Comunicaciones I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas 1992. Ed. Univ. Jaume I, Castellón (España): 205-214.

Al-Hilal, Mohamed (2016): **Establishing the range of background for radon variations in groundwater along the Serghaya fault in southwestern Syria.** Geofísica internacional (2016) 55-4: 255-266

Al-Hilal, Mohamed (2020): **Radon as a natural radiotracer to investigate infiltration from surface water to nearby aquifers: a case study from the Barada Riverbank, Syria.** Geofísica Internacional (2020) 59-3 208-223

Álvarez, E., I. Vinardell, J.R. Fagundo-Castillo, E. Reguera, M. E. Cardoso (1990): **Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. II- Sistema automatizado para el monitoreo de las aguas.** Voluntad Hidráulica, 83: 15-25.

Amado G., E., L.H. Blanco (2010): **Aplicación del Modelo de Interacción Iónica de Pitzer a coeficientes osmóticos de soluciones de KCl en función de la temperatura.** Revista BISTUA :31-46

Anati, D. A.; J. R. Gat (1988): **Restricted marine basins and marginal sea environment. En/ P. Fritz & J. Ch. Fontes (ed): Handbook of environmental isotope geochemistry,** Vol. III, Vienna: IAEA, 73:

Antigüedad, I.; M. Arellano; M. L. Calvache; M. V. Esteller; J. R. Fagundo; M. A. Gómez; A. González; A. González; J. Gutiérrez; H. Llanusa; M. López; L. F. Molerio; T. Morales; I. Morell; I. Mugerza & A. Pulido (1997): **Curso Avanzado sobre Contaminación de Aguas Subterráneas. Monitoreo, Evaluación, Recuperación.** 2 vols., Castellón, 324:

Appelo, C.A.J., D. Postma (2005): **Geochemistry, Groundwater and Pollution.** Second Edition A.A. Balkema Publishers, Leiden, 634:

Araguás Araguás, L.; R. Gonfiantini (1992): **Los isótopos ambientales en los estudios de la intrusión marina.** Vienna: IAEA, 60:

Arellano, D.M., J.R. Fagundo-Castillo (1985): **Criterio acerca de la zonación geoquímica de un acuífero cársico mediante índices químico-físicos, parámetros hidroquímicos y relaciones iónicas.** Voluntad Hidráulica, 66: 2-13.

Arellano, D.M., J.R. Fagundo, J. Silar (1987): **Radiocarbon dating in a horizontal coastal aquifer.** IAEA-SM-023, Viena.

Arellano, D.M., R. Feitoo, K.P. Seiler, W. Stichler, W, Rauert (1989): **Estudio isotópico de la Llanura Costera sur, provincia de Pinar del Río, Cuba.** Doc.-Téc. Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina, Viena,:229-243

Arellano Acosta, M.; L.F. Molerio León & A. Surí Hijos (1992): **¿Efecto de Altitud del ¹⁸O en la Zona de Articulación de Llanura Criptocársica con Carso de Montaña?** GTICEK. Taller Internac. sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló :29-42

Back, W. (1963): **Preliminary results of a study of calcium carbonate saturation of groundwater in Central Florida.** Internatl Ass. Sci. Hydrol, 8:43-51

Barnes, I. W. Back (1964): **Dolomite solubility in ground water.** Art. 160 US. Geol. survey Paper 475-D:D179-D180

Back, W. (1960): **Origin of hydrochemical facies of ground water in the Atlantic Coastal Plain.** Internatl. Geol. Cong., Geochemical cycles: Internatl. Geol. Cong., 21st Copenhagen, 1960, Proc., pt. 1:87-95

Back, W. (1966): **Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part of Atlantic Coastal Plain.** Geological Survey Professional Paper 498-A, Washington, 42:

Back, W., B.B. Hanshaw (1970): **Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan.** Journal of Hydrology, v. 10:330–368

Back, W., B.B. Hanshaw (1971): **Rates of physical and chemical processes in a carbonate aquifer.** Repr. Advances I Chemistry Series 106

Back, W., B.B. Hanshaw, L.N. Plummer, P.H. Rahn, C.T. Rightmire, M. Rubin (1983): **Process and rate of dedolomitization: mass transfer and C14 dating in a regional carbonate aquifer.** Geol.Soc. Am. Bull. 94 (12), 1415-1429.

Back, W., B.B. Hanshaw, J.N. Van Driel (1984): **Role of groundwater in shaping the eastern coastline of the Yucatan Peninsula, Mexico.** In: **Groundwater as a Geomorphic Agent** (ed. By R.G.LaFleur) , 281-293. Allen and Unwin Inc., Boston.

Bögli, A. (1960): **Kalklösung und Karrendildung.** Z. Geomorph. Supp. 2, Internatl. Bettr. Karstmorphologie:4-21

Bögli (1965): **The role of corrosion water by mixed water in cave forming.** Proc. Internatl. Spel. Conf. Brno. 1964, I:125-131.

Bögli, A. (1980): **Karst Hydrology and Physical Speleology.** Springer-Verlag, Heidelberg, 284:

Brown, M.C., T.M.L. Wigey (1969): **Simultaneous tracing and gaging to determine water budgets in inaccessible karst aquifers.** Proc. 5th Internatl Congr. Speleol, Band 5, Hydrologie des Karstes, Hy 3/1-3/5

Burnett, W.C., Dulaiova, H. (2003): **Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements.** Journal of Environmental Radioactivity, 69 (1–2), 21–35.

Burnett, B, T. Nelson, R. Corbett, L. Robinson, J. Weaver, J.E. McKisson, D. Lane-Smith (1998): **Improvements in the measurement of Rn-222 in natural waters.** 44th Annual Conf. Bioassay, Analytutical, and Environ. Radiochem, New Mexico, 4 pp.

Carrazana González, J., O. Dominguez Ley, G. Åkerblom, L. Molerio León and R. Gil Castillo (2010): **Exposure to radon in tourist caves in Cuba.** Int. J. Low Radiation, Vol. 7, No. 2, 2010, :133-13

Catalán Lafuente, J.G. (1969): **Química del agua**. Edit. Blume, Madrid, 355:

Chebotarev, I. I. (1955): **Metamorphism of natural waters in the crust of weathering—1**. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 8, Issue 1-2, pp.22-32

Chuang, L.(1998): **A guidance system for choosing analytical contaminant transport models**. PhD Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.

Clark, I.D. , P. Fritz (1997): **Environmental Isotopes in Hydrogeology**., Boca –Raton, New York: Lewis Publ., 328:

Clayton, R. N.; I. Friedman; D. L. Graf; T. K. Mayeda; W. F. Meents; N. F. Shimp (1966): **The origin of saline formation waters. 1. Isotopic composition**. J. Geophys. Res. (United States) 71(6):3869-3882

Craig, H.; L. I. Gordon (1965): **Deuterium and Oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere**. En/ **Tangiorgi, E. (ed): Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures** - Vienna: IAEA, 130:

Cook, P.G., Wood, C., White, T., Simmons, C.T., Fass, T., Brunner, P. (2008): **Groundwater inflow to a shallow, poorly-mixed wetland estimated from a mass balance of radon**. *Journal of Hydrology*, **354** (1–4), 213–226.

Dansgaard, W. (1964): **Stable Isotopes in Precipitation**. Tellus (Norway) (16):436-468

Dreybrodt, W. (1988): **Processes in karst system. Physics, Chemistry and Geology**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 288:

Dreybrodt, W., D. Buhmann (1991): **A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion**. Chemical Geology, 90 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam:107-122

Dreybrodt, W., D. Buhmann, J. Michaelis, E. Usdowski (1992): **Geochemically controlled calcite precipitation by CO2 outgassing: Field measurements of precipitation rates in comparison to theoretical predictions**. Chem Geol 97 : 285–294

El-Sharkawy, A., Al-Ghamdi, H. (2018): **Study of the Presence of Radon in Groundwater from Two Regions in Saudi Arabia**. *Journal of Water Resource and Protection*, **10**, 654-662.
<https://doi.org/10.4236/jwarp.2018.107037>

Eriksson, E. (1967): **Isotopes in Hydrometeorology**. Isotopes in Hydrology, Vienna: IAEA, 233:

Eriksson, E. (1976): **The distribution of salinity in groundwaters of the Delhi region and recharge rates**. Proc. Symp. Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology, I Vienna: IAEA, 1778:

Eriksson, E. (1983): **Stable isotopes and tritium in precipitation**. IAEA: Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Tech. Rep. Series 91, Vienna: IAEA, 193:

Fagundo-Castillo, J.R. (1982): **Determinación de índices para la caracterización de aguas cársicas mediante fórmulas semi empíricas**. Coloquio Internacional sobre Hidrología Cársica de la Región del Caribe, La Habana, pág. 496-509

Fagundo-Castillo, J.R. (1985): **Caracterización de acuíferos mediante relaciones entre contenidos iónicos y parámetros quimicofísicos**. Revista CENIC Ciencias Químicas, 16 (2): 321-236

Fagundo-Castillo, J.R. (1990a): **Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Estudio mediante simulación química del efecto de la litología**. Voluntad Hidráulica, 83: 28-37

Fagundo-Castillo, J.R. (1990b): **Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales**. Hidrogeología (Granada), 5: 33-46

Fagundo-Castillo, J.R. (1998): **Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales**. Ingeniería Hidráulica, 19 (2): 62-79

Fagundo-Castillo, J.R. (2007): **Geoquímica de las aguas subterráneas que drenan carbonatos de diferente naturaleza geológica**. En: Memorias, Trabajos y Resúmenes. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias’ 2007). Centro Nacional de Información Geológica, Instituto de Geología y Paleontología de Cuba, La Habana, CD-Rom

Fagundo-Castillo, J.R. (1982): **Determinación de índices para la caracterización de aguas cársicas mediante fórmulas semi empíricas**. Coloquio Internacional sobre Hidrología Cársica de la Región del Caribe, La Habana, pág. 496-509

Fagundo-Castillo, J.R. (1985): **Caracterización de acuíferos mediante relaciones entre contenidos iónicos y parámetros quimicofísicos**. Revista CENIC Ciencias Químicas, 16 (2): 321-236

Fagundo-Castillo, J.R., P. González Hernández, M. Suárez Muñoz, C. Melián, J. Pajón-Morejón, J. Fagundo Sierra, J., M. Llerena (2003): **Hidrogeoquímica de flujos locales, intermedios y regionales de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba**. En: V Congreso Cubano de Geología y Minería, Memorias Geomin 2003, La Habana, marzo 24-28.

Farfán González, H., L.F Molerio-León. (2020): **Modelo analítico advectivo-dispersivo en 2D para la inyección de aguas producidas en yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos someros salinizados**. Argentina Subterránea, 20(47-48):79-82. <https://www.researchgate.net/publication/345344540>

Ferronsky, V. I.; V. S. Brezgunov (1980): **Stable isotopes and ocean dynamics**. En P. Fritz & J. Ch. Fontes (ed): **Handbook of environmental isotope geochemistry, Vol. III**:1-27 Vienna: IAEA, 345:

Freeze, R.A., P.A. Witherspoon (1966): **Theoretical analysis of regional groundwater flow, 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model**. Water Resour. Res. 2:641

Freeze, R.A., P.A. Witherspoon (1967): **Theoretical analysis of regional groundwater flow, 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variations**. Water Resour. Res. 3:623

Freeze, R.A., P.A. Witherspoon (1968): **Theoretical analysis of regional groundwater flow, 3. Quantitative interpretations**. Water Resour. Res. 2:641

Foster, S.S.D. , R. Hirata (1988): **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. CEPIS Technical Report (WHO-PAHOCEPIS, Lima-Peru).

Gat, J. R. (1981): **Isotopic fractionation**. En Gat, J.R., R. Gonfiantini (1981): **Stable isotope hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle**. IAEA Tech. Rep. Series 210, Vienna: IAEA, 334:

Gat, J.R., R. Gonfiantini (1981): **Stable isotope hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle**. IAEA Tech. Rep. Series 210, Vienna: IAEA, 339:

Gat, J. R.; Y. Tzur (1967): **Modification of the isotopic composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge**. Isotopes in Hydrology. Vienna: IAEA, 496:

Genereux, D.P., Hemond, H.F., Mulholland, P.J. (1993): **Use of radon-222 and calcium as tracers in a three-end-member mixing model for streamflow generation on the West Fork of the Walker Branch Watershed.** *Journal of Hydrology*, **142**, 167–211

Gonfiantini, R.; M. Simonot (1987): **Isotopic investigations of groundwater in the cul-de-Sac Plain, Haiti.** Proc. Symp. Isotope Tech. in Water Resources Development, Vienna: IAEA, 506:

González Báez, A., K.P. Seiler, W. Stichler, W. Rauert (1989): **Estudio mediante isótopos ambienteas del origen de las aguas subterráneas y de la intrusión salina en la parte central de la Cuenca Sur de Matanzas, Cuba.** Doc.-Téc. Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina, Viena,:245-258

Guiseppe, Vincente E. (2006): **Radon in Ground Water: A Study of the Measurement and Release of Waterborne Radon and Modeling of Radon Variation in Bedrock Wells.** Electronic Theses and Dissertations. 315. <http://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/315>

Gutiérrez, J.; H. Travieso (1978): **Características físicas y químicas de las aguas de precipitaciones cubanas.** Voluntad Hidráulica, La Habana (47-48):18-22

Hanshaw, B.B., W. Back (1985): **Deciphering hydrological systems by means of geochemical processes.** Hydrological Sciences — Journal des Sciences Hydrologiques, 30, 2, 6/1985: 257-271

Hanshaw, B.B., W. Back, R.G. Deike (1981): **A geochemical hypothesis for dolomitization by groundwater.** Repr. Economic Geology, 66 (5), August:710-724

Herrera, C., M. Pincheira, E. custodio, L. Araguás, G. Velasco (2004): **El contenido de tritio de las aguas subterráneas de la Isla de Pascua,** Chile, como una herramienta para calcular la recarga al acuífero volcánico. Bol. Geol. y Minero 115:299-310

Hunkeler, D., E. Hoehn, P. Höhener, J. Zeyer (1997): ²²²Rn as a partitioning tracer to detect diesel fuel contamination in aquifers: laboratory and field observations. Environ.Sci. Technol, 31 pp 3180-3187.

Hunkeler, D, P. Höhener, J. Sèller (1997): Can ²²²Rn be used as a partitioning tracer to detect mineral oil contaminations?. Tracer Jydrol. 97, Kranjc J. (Ed): Balkema, Rotterdam, pp 63-68

Hsu, K. J. (1963): **Solubility of dolomite and composition of Florida ground waters.** Jour. Hydrol. 1:288-310

Jackson, R. E. (1986): **Pollution et Protection des aquiferes.** UNESCO, Etudes et Rep. Hydrol. , Paris, 434 pp.

Jolankái, G. (1992): **Hydrological, chemical and biological processes of contaminant transformation and transport in river and lake systems.** UNESCO, Tech. Doc. Hydrol., Paris 147:

Kamensky, G.N. (1958): **Hydrochemical zoning in the distribution of underground waters.** Proc. Sympp. Ground Water, Pub. 4,:281

Kim, H. T., W. J Frederick (1988a): **Evaluation of Pitzer Ion Interaction Parameters of Aqueous Electrolytes at 25°C. 1. Single Salt Parameters.** J. Chem. Eng. Data 33 :177-184.

Kim, H. T., W. J Frederick (1988b): **Evaluation of Pitzer Ion Interaction Parameters of Aqueous Electrolytes at 25°C. 2. Ternary Mixing Parameters.** J. Chem. Eng. Data 33, 278-283. Innovación, Año 20, Nº 1 .2008) :21-31

Kluge, T., Ilmberger, J., Rohden, C. von, Aeschbach-Hertig, W. (2007): **Tracing and quantifying groundwater inflow into lakes using radon-222.** Hydrology and Earth System Sciences Discussion, 4, 1519–1548.

Leibundgut, Christian, Piotr Maloszewski, Christoph Kulls (2009): **Tracers in hydrology.** Wiley-Blackwell, 415:

Massei, N., B.J. Mahler, M. Bakalowicz, M. Fournier, J.P. Dupont (2007): **Quantitative Interpretation of Specific Conductance Frequency Distributions in Karst.** GROUND WATER 45(3)—May–June:288–293

Molerio León, Leslie F. (1985): **Dominios de Flujo y Jerarquización del Espacio en Acuíferos Cársicos.** Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana: 54; In/Núñez Jiménez, A. (1990): **Medio siglo explorando a Cuba. Historia documentada de la Sociedad Espeleológica de Cuba.** Tomo II, Imprenta Central de las FAR, La Habana, :322, <https://www.researchgate.net/publication/344398777>

Molerio León, L. F. (1992a): **Composición Química e Isotópica de las Aguas de Lluvia de Cuba.** II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba:20-21

Molerio León, Leslie F. (1992b): **Modelo de Transporte de Masa en la Zona No Saturada de los Acuíferos Cársicos. 1/Algoritmo ADRIANA (versión 2.91).** 1er Taller Iberoamericano de Informática y Geociencias, Acad. Cienc. Cuba, La Habana:34

Molerio León, L.F. (1999): **Identificación de las fuentes de contaminación y completamiento de la red de monitoreo de las aguas subterráneas en la Planta de Gas de Varadero.** *Reporte inédito.* CESIGMA, S.A., C99-A-12-Etapas I y II, La Habana, 42:

Molerio León, L. F. (2000): **Design of Seawater Intrusion Early Warning Systems in Coastal Karstic Aquifers: A Multivariate Approach.** Unesco Project. 3.2.

Molerio León, L.F. (2002): **Primeras mediciones de Radón en cuevas cubanas.** Com. Hidrogeología Cársica. Sociedad Espeleológica de Cuba.

Molerio León, L.F. (2003): **Aplicaciones de Radón-222 en la identificación de contaminación por hidrocarburos en acuíferos cársicos.** VII Taller Internacional “Informática y Geociencias”. GEOINFO 2004. Comisión de Modelación Matemática. <http://www.iga.cu>. *Revista Electrónica “Memorias de Geoinfo”, La Habana, Cuba*

Molerio León, L.F. (2004): **Cave levels, safe yield and turnover time in karst aquifers.** IAEA-CN-104/P-76. Proc Isotope hydrology and integrated water resources management, Vienna, Austria,. :184

Molerio León, L.F. (2006a): **Procesos de Transporte de Masas en la Cuenca Santa Ana, Cuba. 1. Transporte en la zona no saturada.** Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (113), Madrid, (España) Octubre:72-81.

Molerio León, L.F. (2006b): **Procesos de Transporte de Masas en la Cuenca Santa Ana, Cuba. 2. Variabilidad espacial e incertidumbre de las propiedades físicas.** Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (113), Madrid (España) Octubre:82-88.

Molerio León, L.F. (2006c): **Radón 222, Tritio, intrusión marina y contaminación por hidrocarburos en acuíferos cársicos litorales.** Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (108), Madrid, Abril :25-30.

Molerio León, L.F. (2006d): **Isotopic evidence of the overexploitation of karst aquifers**. in: Demuth, S., A. Gustard, E. Planos, F. Scatena, E. Servat (Eds.) Climate Variability and Change: Hydrological Impacts. IAHS Publ. 308, Wallingford. Climate: 629-634

Molerio León, L.F. (2007a): **Hidrología de Trazadores en la gestión ambiental de yacimientos de petróleo onshore**. 2a. Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. VII Congreso de Geología, GEO5-P22, La Habana, Marzo 20-23, 2007:771-814. Publicado en CD-ROM ISBN:978-959-7117-16-2

Molerio León, L.F. (2007b): **Radon 222 and Tritium in the prevention of sea water intrusion and oil pollution in a coastal karst aquifer**. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in sustainable Water Resources Management, Vienna, Austria, 21-25 May, 2007. IAEA-CN-151/124.

Molerio León, L.F. (2007c): **Tritium as an indicator of groundwater overexploitation in a tropical karst aquifer**. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in sustainable Water Resources Management, Vienna, Austria, 21-25 May, 2007. IAEA-CN-151/125

Molerio León, L.F. (2012): **Hidrología de Trazadores en la gestión ambiental de yacimientos de petróleo onshore**. Mapping Interactivo. No. 154, Julio-Agosto, 2012

Molerio León, L.F. (2015): **Disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados**. Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2015, Vol.16, No.1, pp.75-87, ISSN 1729-3790

Molerio-León, L.F. (2017): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos litorales someros salinizados. 3. Transferencia de calor**. Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente, 17 (33), julio-diciembre 2017

Molerio-León, L.F. (2019): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de Yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos Litorales someros salinizados**. Octava Convención de Ciencias de la Tierra, Geociencias'2019. XIII Congreso de Geología (GEOLOGÍA'2019). V Taller sobre Aguas subterráneas, Gestión y Contaminación GEO11-CE1. Resumen. Conferencia especial, La Habana: 178

Molerio-León, L.F. (2020a): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos someros salinizados. 1. Ecuaciones de gobierno**. Argentina Subterránea, 20(47-48):71-74. <https://www.researchgate.net/publication/345344234>

Molerio-León, L.F. (2020b): **Modelo para la disposición final de aguas producidas tratadas de yacimientos gasopetrolíferos carbonatados en acuíferos cársicos someros salinizados. 2. Aplicabilidad del modelo**. Argentina Subterránea, 20(47-48):75-77. <https://www.researchgate.net/publication/345344524>

Molerio-León, L.F. (2020c): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba: I. Aplicaciones del nomograma modificado de Schoeller**. Gota a gota, 21: 81-88. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.). https://drive.google.com/file/d/1-7T5OrVnMe_rIEyVuA2ZuBtyrR1oAZ4V/view

Molerio-León, L.F. (2020d): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba: II. Aplicaciones del nomograma modificado de Schoeller – Metodología e Interpretación**. Gota a gota, (22): 13-17. <https://drive.google.com/file/d/10NQ25dn1EoGvwj71fxFTaTwPUL3q6Gv7/view> <https://www.researchgate.net/publication/345344552>

Molerio-León, L.F. (2020e): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba: 3. Composición isotópica de las aguas de lluvia**. Gota a gota, nº 22: 70-82 <https://www.researchgate.net/publication/348402581>

Molerio-León, L.F. (2021a): **Petróleo y Karst: Bases teóricas de una tecnología para la disposición final de aguas producidas tratadas en acuíferos cársicos someros y cuerpos de agua salinizados**. La Habana, 102: <http://fade.smartnec.com/images/prod/lyD9XLDi9F6eaoKQoCoRBarRn4rNvd.pdf> <https://www.researchgate.net/publication/351274801>

Molerio-León, L.F. (2021d): **Petróleo y karst 2: el papel del cavernamiento en el control de la migración de la inyección somera de aguas producidas en medios cársicos**. Argentina Subterránea 21(50) OCTUBRE-NOVIEMBRE 2021:21-46, ISSN 1851-894x <http://www.fade.org.ar/Bibliografia.html>, <https://www.researchgate.net/publication/356893720>

Molerio-León, L.F. (2021e): **La Sima de La Ruda (Mayabeque, Cuba) y el problema Conceptual del origen de las cavidades embrionarias y las protocuevas (I): efecto de mezcla y condensación**. Gota a gota, nº 23 (2021): 49-59 Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.) <https://www.researchgate.net/publication/350190571>

Molerio-León, L.F. (2021f): **La Sima de La Ruda (Mayabeque, Cuba) y el problema Conceptual del origen de las cavidades embrionarias y las protocuevas (II): La variedad de patrones**. Gota a gota, nº 25 (2021): 1-11 Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.) <https://www.researchgate.net/publication/356893731>

Molerio-León, L.F. (en prensa): **Métodos no convencionales de prospección de petróleo y gas: karst hipogénicos de Cuba Occidental**. Revista Maya de Geociencias

Molerio León, Leslie F.; E. Fariñas Padrón & O. Azcue Manso (1990): **Procesos Termodinámicos en la Cueva de La Virgen, Ciudad de La Habana, Cuba**. Congr. 50 Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana: 53

Molerio León, L.F., I. M. Fernández Gómez y J. A. Carrazana González (2012a): **Radón 222 y Tritio en la identificación y cuantificación de la contaminación por hidrocarburos (LFNA) en las aguas subterráneas. 1. Principios teóricos**. Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. Año 13, No.24, 2012 ISSN-1683-8904, La Habana, 7: <http://ama.redciencia.cu/articulos.php?sid=91529a91e366de61e4ac7b8e3f27fb89>

Molerio León, L.F., I. M. Fernández Gómez y J. A. Carrazana González (2012b): **Radón 222 y Tritio en la identificación y cuantificación de la contaminación por hidrocarburos (LFNA) en las aguas subterráneas. 2. Patrones de 222Rn, 3H y Cl**. Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. Año 13, No.24, 2012 ISSN-1683-8904, La Habana, 7:

Molerio León, L.F.; M.G. Guerra Oliva, R.M. Leal (2013): **Modelo Difusivo de Transporte de Masa (Algoritmo Adriana, Versión 2.91) y Curvas de Retención de Humedad en la Zona No Saturada de los acuíferos cársicos (Modelo RETC). Aplicación a las cuevas del tercio superior del curso subterráneo del río San Antonio, Artemisa, Cuba**. Mapping Latino. 23 Septiembre 2013, 51: <http://mappinglatino.com/blog/2013/09/23/modelo-difusivo-de-transporte-de-masa-algoritmo-adriana-versin-2-91-y-curvas-de-retencion-de-humedad-en-la-zona-no-saturada-de-los-acuferos-crsicos-modelo-retc-apl/>

Molerio León, L.F. y N. Herrera Yanes (2005): **Recuperación de un campo de pozos para suministro de agua salada en un acuífero cársico litoral**. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (106), Madrid, Noviembre: 40-49

Molerio León, L.F., P. Maloszewski, M.G. Guerra, K. del Rosario (2000): **Hidrodinámica isotópica de los sistemas cársicos Jaruco y Aguacate, Cuba**. Resumen. Congr. Internac. 60 Aniv. Soc. Espel. Cuba, Fundación Antonio Núñez Jiménez de la Naturaleza y el Hombre. Camagüey, Abril 18-21, 2000 :95

Molerio León, L.F., P. Maloszeswski, M.G. Guerra Oliva, D.M. Arellano, K. del Rosario (2002): **Hidrodinámica isotópica de los sistemas acuíferos Jaruco y Aguacate, Cuba**. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXIII (2):3-9

Molerio León, L.F., D. Marrero Pérez (2020): **Algoritmos, resultados e implicaciones ingenieras del proceso de denudación cársica: 1. Identificación del problema**. Gota a gota, no 20: 48-56. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.) <https://drive.google.com/file/d/1asyBvBXhX9xN7lF73jno8fUjVdxupgi8/view>

Molerio León, L.F., M.C. Martínez Hernández, O. Sardiñas Gómez (2021): **Aceptabilidad ambiental del proceso de disposición final de las aguas producidas del Yacimiento Canasí**. INVERSIONES GAMMA, S.A. Contrato IG-AM-125-21, La Habana, 100:

Molerio León, L.F., K. del Rosario, J.C. Torres Rodríguez, E. Rocamora Álvarez, M.G. Guerra Oliva (2002a): **Factores de control de la composición química e isotópica de las aguas subterráneas en la región Varadero-Cárdenas, Matanzas, Cuba**. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, 23(2):36-46

Molerio León, L.F., E. Rocamora Álvarez (2005): **Sistemas acuíferos del noreste de la provincia de La Habana, Cuba**. Memorias. VI Congreso de Geología, La Habana. Memorias 1ª Conv. Cubana de Ciencias de la Tierra. 11:

Nagy, I. (1976): **Contaminación de acuíferos y su control**. Curso Post Univ. Sobre Explotación de Acuíferos, La Habana, 106:

Nakasone, S.; Ishimine, A.; Shiroma, S.; Masuda, N.; Nakamura, K.; Shiroma, Y.; Ooka, S.; Tanaka, M.; Kato, A.; Hosoda, M.; et al. (2021): **Temporal and Spatial Variation of Radon Concentrations in Environmental Water from Okinawa Island, Southwestern Part of Japan**. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18,998. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030998>

Palmer, A.N. (2012): **Geología de cuevas**. Cave Books, Guangdon, China, 502:

Pitzer K. S. (1979): **Theory: ion interaction approach**, en: **Activity coefficients in electrolyte solutions**, R. M. Pytkowicz [Ed], CRC Press, Boca Raton: 157-208.

Pitzer K. S. (1987): **A thermodynamic model for aqueous solutions of liquid-like density**, en: **Thermodynamic modeling of geological materials: Minerals, fluids and melts**. Reviews in Mineralogy, I. S. E. Carmichael y H. P. Eugster .[Eds.]:97-142.

Pitzer, K. S. (1991): **Activity Coefficients in Electrolyte Solutions**, 2nd ed.; Pitzer, K. S., Ed.; CRS Press.

Peláez García R., N.A. González Cabrera (2013): **Underground Water of Deep Circulation in the National Park Guanahacabibes, Pinar del Rio Province, Cuba: Another Alternative with Water Supply Aims**. In: Farfán González H, Corvea Porras JL, de Bustamante Gutiérrez I, LaMoreaux JW [Eds]: **Management of Water Resources in Protected Areas**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg,:179-186

Plummer, L.N., W. Back (1980): **The mass balance approach: application to interpreting the chemical evolution of hydrologic systems**. Amer. Jour. Sci, 280:130-142

Rodríguez, R. C. Bejarano, B. Riverón, J.A. Carmenate (2004): **Composición química de las precipitaciones, deposición de sales y evaluación de la recarga en la región oriental de Cuba**. Boletín Geológico y Minero, 115, Núm. especial: 341-356

Salih M. Musa Isam (2003): **Radon in natural waters. Analytical Methods; Correlation to Environmental Parameters; Radiation Dose Estimation; and GIS Applications**. Linköping University, Sweden, 46:

Santiago Fernández, J.F. (2020?): **Tarea Técnica para la “Modelación del tiempo de tránsito hacia el mar y de la dilución del efluente de la depuradora de agua de capa del Yacimiento Canasí al ser infiltrado en el acuífero costero somero” (“Identificación de la compatibilidad geoquímica entre las aguas de capa tratadas del Yacimiento Canasí y las del acuífero cársico somero salinizado subyacente”**. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana, sin paginar.

Schoeller, H. (1941): **Les modifications de la composition chimique de léau dans une même nappe**. Ass. Internatl. Hydrol. Scientifique, Ass. Oslo:124-129

Schoeller, H. (1948): **L’influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses**. Bull. Soc. Géol. Fr. XI, (5): 267-289

Schoeller, H. (1956): **Geochimie des eaux souterraines: Application aux eaux du gisement de petrole**. Technip, Paris, 213:

Schoeller, H. (1959): **Arid Zone Hydrology Recent Developments**. Arid Zone Research-XII. UNESCO, Paris, 125:

Schoeller, H. (1962): **Les Eaux Souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, Exploitation et Évaluation des Ressources**. Mason et Cie, Paris, 642:

Schubert, M., L. Brueggemann, K. Knoeller, M. Schirmer (2011): **Using radon as an environmental tracer for estimating groundwater flow velocities in single-well tests**. Water Resour. Res., 47, W03512, doi:10.1029/2010WR009572.

Schwartz, F.W., P.A. Domenico (1973): **Simulation of hydrochemical patterns in regional groundwater flow**. Water Reourc. Res., 9:707

Schwartz, F.W. K. Muehlenbachs, D.W. Chorley (1981): **Flow-System Controls of the Chemical Evolution of Groundwater**. In: W. Back y R. Letölle (Edit), Symp. Geochemistry of Groundwater. 26th Internatl. Geol. Congr., J. Hydrol, 54:225-243

Shuster, E.T., W.B. White (1971): **Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers**. Jour. Hydrol.14:93–128

Stout, G. E.; F. A. Huff (1967): **Rainout characteristics for hydrological studies**. Isotopes in Hydrology, Vienna: IAEA, 617:

Struckmeier, W.F. y J. Margat (1995): **Hydrogeological Maps. A Guide and a Standard Legend**. Internatl. Ass. Hydrogeol, Verlag, Hannover, 177:

Surbeck, H. (1996): **A Radon-in-Water based on fast gas transfer membranes**. Internatl. Conf. Technologically enhanced natural radioactivity caused by non-uranium mining, Szczyrk, Polonia, 9 pp

Thraillkill, J. (1968): **Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves**. Geol. Soc. Amer. Bull. 79:19-46

Tóth, J. (1962): **A theory of ground water motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada**. J. Geophys. Res. 67:4375

Tóth, J. (1963): **A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins**. Journ. Geophys. Res., 68:4795-4812.

Tóth, J. (1970): **A conceptual model of the groundwater regime and the hydrologic environment**. J. Hydrol.:164

Tóth, J. (2009): **Gravitational Systems of Groundwater Flow. Theory, Evaluation, Utilization.** Cambridge University Press, New York, 297:

Trujillo, E., V Martínez, N. S. Flores (2008): **Ajuste del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono.** Información Tecnológica 19(6): 89-101

Wallick, E.J. y J. Tóth (1976): **Methods of regional groundwater flow analysis with suggestions for the use of environmental isotopes.** Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. Proc. Advisory Group Meeting, IAEA, Vienna, Jan 27-31, 1975:37-64

Weber, C.F. .2000. **Calculation of Pitzer Parameters at High Ionic Strengths.** Ind. Eng.Chem. Res. 39: 4422-4426

Weiss, W., W. Roether (1980): **The rates of Tritium input to the World Ocean.** Earth Plante. Sci.Lett., (United States) 49, 435-446

Werner, D., P. Höhener (2002a): **Diffusive partitioning tracer test for Nonaqueous Phase Liquid (NAPL) detection in the vadose zone.** Environ. Sci. Tecnol, 36 pp 1592-1599

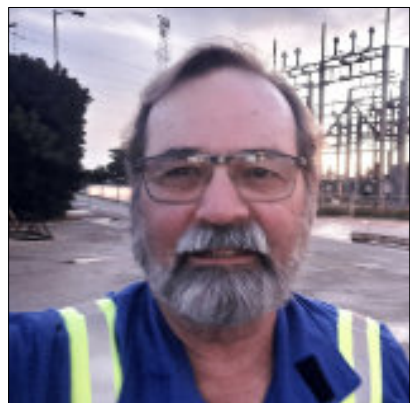
Werner, D., P. Höhener (2002b): **The influence of water table fluctuations on the volatilization of contaminants from groundwater.** Proc. Groundwater Quality 2001, Sheffield, IAHS Publ. 275, pp 213-218

White, W. B. (1997): **Thermodynamic equilibrium, kinetics, activation barriers, and reaction mechanisms for chemical reactions in Karst Terrains.** Environmental Geology 30 (1/2) March 1997:46-58

Weyl, P.K. (1958): **The solution kinetics of calcite.** Jour. Geol. 66:163-176

Worthington, S.R.H., R.W.N. Soley (2017): **Identifying turbulent flow in carbonate aquifers.** Journal of Hydrology 552 (2017) 70–80

Yurtsever, Y.; J. R. Gat (1981): **Atmospheric waters. in/ Gat, J.R., R. Gonfiantini (1981): Stable isotope hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle.** IAEA Tech. Rep. Series 210, Vienna: IAEA, 1032



LESLIE F. MOLERO LEÓN. Geólogo de Yacimientos Minerales e Hidrogeólogo-Hidrotécnico, cubano, MSc. en Hidrología Isotópica con pre y posgrados y docencia en universidades y centros de Investigación europeos y latinoamericanos. Ex-Director del Servicio Hidrogeológico de la República de Cuba y del Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas, Consultor Ambiental, Especialista Principal en Proyectos e Ingeniería (INVERSIONES GAMMA, S.A.), Especialista en Obras Subterráneas y Auditor Ambiental titulado. Experto para agencias de Naciones Unidas, del sistema interamericano y consultoras internacionales de varios países. Con 57 años de vida laboral activa, ha participado en unos 490 proyectos de su especialidad en 50 países. Autor o coautor de unos 370 artículos científicos y de 19 libros de su especialidad.

IMPORTANT CONTRIBUTIONS IN GEOSCIENCES PROMISE TO REVOLUTIONIZE O&G&M EXPLORATION. No 5/10.

THE THIRD PART OF THE GULF OF MEXICO THAT BELONGS TO COLOMBIA. A MARVELOUS, MAGICAL, AND CINEMATIC JOURNEY THROUGH THE JURASSIC PERIOD, TOLD BY EDINSON ALVAREZ.

EDINSON D. ALVAREZ S. 1,2

1 Exploration Geologist, O&G&M Specialist,

Researcher of tectonic and structurally complex areas.

2 Expert in geoscientific solutions through integrated O&G&M studies.
with strong positive economic implications.



Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025): A mechanism used by interdisciplinary groups of specialists in any field of science, where new concepts, new methodologies, new technology, and new knowledge are employed, obtaining new results, in order to resolve complex issues.. (Image Courtesy of Pixabay).

EAST-P Method-Tool (Processing and Seismic Treatment Edinson Alvarez 2025): It requires specialized personnel, computer equipment and advanced software.

Edinson Geochemical Hydrocarbon Family Classification Maps -Tool (Edinson Alvarez 2025): New classification of hydrocarbon families based on geochemical-isotopic-molecular signatures, migration pattern from source rock, their close relationship with geology, geochemical modeling of generation, expulsion, and hydrocarbon migration routes in a regional context.

Integrated O&G&M studies - Onshore-Offshore-Tool: It involves the participation of more than 20 geoscience disciplines, in order to find answers to complex industry problems, with strong positive economic implications.

Citation: Alvarez Serrato Edinson Dario, 2025 The Third Part Of The Gulf Of Mexico That Belongs To Colombia. A Marvelous, Magical, And Cinematic Journey Through The Jurassic Period, Told By Edinson Alvarez. Important Contributions In Geosciences Promise To Revolutionize O&G&M Exploration. No 5/10.Revista Maya December 2025. 39 p.
Citation Articles 1,2,3, at the end.

INTRODUCTION

This work aims to contribute to the geoscientific knowledge of an area of importance to the global oil, gas, and mining (O&G&M) industry: the Jurassic evolution of the Gulf of America, Gulf of Mexico, and the Colombian and Venezuelan territories (Northwestern Corner of South America-Gondwana). **This study seeks to demonstrate, with technical and scientific evidence, the relationship between plate tectonics, magmatic arcs, volcanic arcs, and the development of rift zones and subduction zones, combined to understand the origin, growth, and development of sedimentary basins of interest to the global mining and energy industry.**

In this first phase, the central theme is resolving the uncertainties or specific unanswered questions posed by the first Spanish explorers in 1525 when they founded the city of Santa Marta and in 1538 when they founded the city of Bogotá, Colombia, approximately 500 years ago. We will also address the questions posed by contemporary geoscientists and researchers worldwide over more than 100 years of the history and development of the petroleum industry in the Gulf of Mexico region. we will examine the implications of this issue for petroleum, mining, and social systems in a broad sense..

On the Colombian side, we would like to highlight the various companies, institutions, entities, and individuals that have contributed to the development of knowledge in these areas, such as the Colombian Geological Service (**SGC**), the Colombian Petroleum Company **Ecopetrol**, the Institute of Petroleum and Transition Energy Research (**ICPET**), the National Hydrocarbons Agency (**ANH**), and state and private universities such as the University of Caldas, its Institute of Stratigraphic Research (**IIES**), the National University of Colombia (**UNAL**), the Industrial University of Santander (**UIS**), the Pedagogical and Technological University of Colombia (**UPTC**), **EAFIT** University, the University of Pamplona, and the University of the Andes, among others...

Highlighting the tireless and important work carried out by the renowned and honorable Doctors: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p. <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>**, Freeto the public through their YouTube conference. **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.**

El Dr. James Pindell has dedicated his entire life to the study, understanding and geological evolution of the Gulf of Mexico with his Master's thesis **Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution. 1981 And Doctoral Thesis: Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region 1985.** And significant and sufficient related work up to the date of 2025.

Highlighting the work of the doctors **Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>**, who have dedicated their entire lives to the study of Colombian Geology, and their work on tectonostratigraphic terrains, in different and renewed versions of 1973, 1988, 1993, 1998, 2020, among others.

We would like to clarify that the narrative style used by the author is solely intended to generate new readers, audience, and interest in scientific research related to Geosciences – Earth sciences. This is to avoid any misinterpretation of arrogance, as the narrative style is simply a strategy for attracting an audience. We have the utmost respect and admiration for those who have made valuable contributions to Geosciences. All glory and praise belong to God.

The narrative form is a tribute to one of the greatest figures in world literature, Miguel de Cervantes Saavedra (1547-1616), with his masterful work, Don Quixote of La Mancha (1605). **In this case, we will refer to "Giants" as concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unresolved questions, etc.** We invite you to see the positive side of history, which is the contributions to geosciences for our country, Colombia, and in this case, the impressive and spectacular Gulf of Mexico.

We will take a spectacular, fascinating, wonderful and cinematic geological journey through the Colombian-Mexican-American Jurassic world.

We also draw a parallel with sports, regarding the giants we are going to demolish in this edition. Records are meant to be broken or demolishing; similarly, if our proposal has weaknesses or flaws, it will most likely be surpassed or toppled by a new and/or better proposal in the future.

METODOLOGY

In order to overcome the structural, stratigraphic, sedimentological, volcanological, geological, geophysical, geochronological, geochemical, and seismological obstacles and difficulties posed by the tectonic-structural complexity of the area, the following activities are carried out:

- Compilation of information from petroleum exploration, geochemical, geophysical, geological, stratigraphic, tectonic-structural, petroleum systems, volcanological, geochronological, and other studies of the area of interest.

- As part of the Author's independent professional activity, several integrated studies have been carried out to address the issue of the structural tectonic complexity of the study area, and its implications for oil and gas exploration and production activity in Colombia and the Gulf of Mexico. **This case relates to tectonostratigraphic evolution, primarily during the Jurassic geological period (145 to 201.3 million years ago), also including the Late Triassic (201.3 to 237 million years ago) (201.3-210 million years ago).**

RESULTS

1. General Tectonic Framework and Terminology.

To understand the development of this chapter, we will refer to the following terms (**Figures 1 and 2**):

Triassic-Jurassic Gulf of Edinson Alvarez: A large body of marine water surrounded by the following geographical features, giving it its gulf-like configuration: the Aoxaca and Chortis terranes to the west-northwest, continental Mexico to the north and east, and continental Colombia to the east-southeast. (Upper Triassic-Lower Jurassic) (**Figures 1 y 3**)

Jurassic Bay of Edinson Alvarez: A narrow body of marine water surrounded by the following geographical features, giving it its bay configuration: the Aoxaca and Chortis terranes to the west-northwest, continental Mexico to the north and east, and continental Colombia to the east-southeast. (Lower Jurassic) (**Figures 4 y 5**)

Edinson's Jurassic Strait: Opening Zone, fracture-rupture zone, entry of the Pacific Ocean into the Gulf of Mexico and Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. (Lower-Middle Jurassic). (**Figures 2,6,7, 9,10 y 14**)

The Edinson's Jurassic Strait, It had several openings or narrow passages named below:

Edinson's Jurassic Strait (North); Main rupture or strait created in the Jurassic 170-169 ma. Between the Mexican Chiapas Massif and the Colombian Upper Guajira (Serrania de Macuira-Cosinas).

JhonEdi's Jurassic Strait (Middle): Break or Strait Created between the Upper Guajira of Colombia (Serrania de Cosinas-Macuira) and the Sierra Nevada de Santa Marta.(Honor Jhon Edinson Alvarez M.–Son)

Floris's Jurassic Strait (South): Break or Strait Created on the Western Side of the Sierra Nevada de Santa Marta,controlled by the Bucaramanga Fault. (**Figure 14**) (Honor Florinda Serrato-Mother)

Independent Milenar's Jurassic Strait: Break or Strait Created to the southwest of the Cundinamarca Basin (Southwestern part of the paleobasin of the Eastern Cordillera) controlled by the Ibagué Fault. (**Figure 14**). (Honor Ana Milena Alvarez Serrato-Sister).

Jurassic Mountain Range Gran Estelar: The Great Triassic-Jurassic Cordillera,formed by the union of the Paleo Sierra Madre Oriental of Mexico and the Paleo Cordillera Central of Colombia, is composed of Precambrian-Paleozoic metamorphic crystalline basement, granitoid intrusions, and fluvial and volcanosedimentary deposits, as well as volcanic arc sedimentary complexes. Paleogeographically, it functions as back retaining wall of the slope escarpment of the Gulf of Mexico, relative to the waters of the Pacific Ocean. (Honor beloved wife Estela Moreno Z.) (**Figures 1, 3, 4 y 5**).

Large Fault System, Rift, Rudabet Lineament (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Father, Figures 1 y 3); Composed of the Great System of faults, rift and lineament of the Guaicáramo- foothills Faults (Colombia), Boconó- foothills Faults(Venezuela), NE Yucatán lineament, Georgia Rift and Appalachian foothills Lineament.

Fig 1. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triasic-Early Jurassic
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.

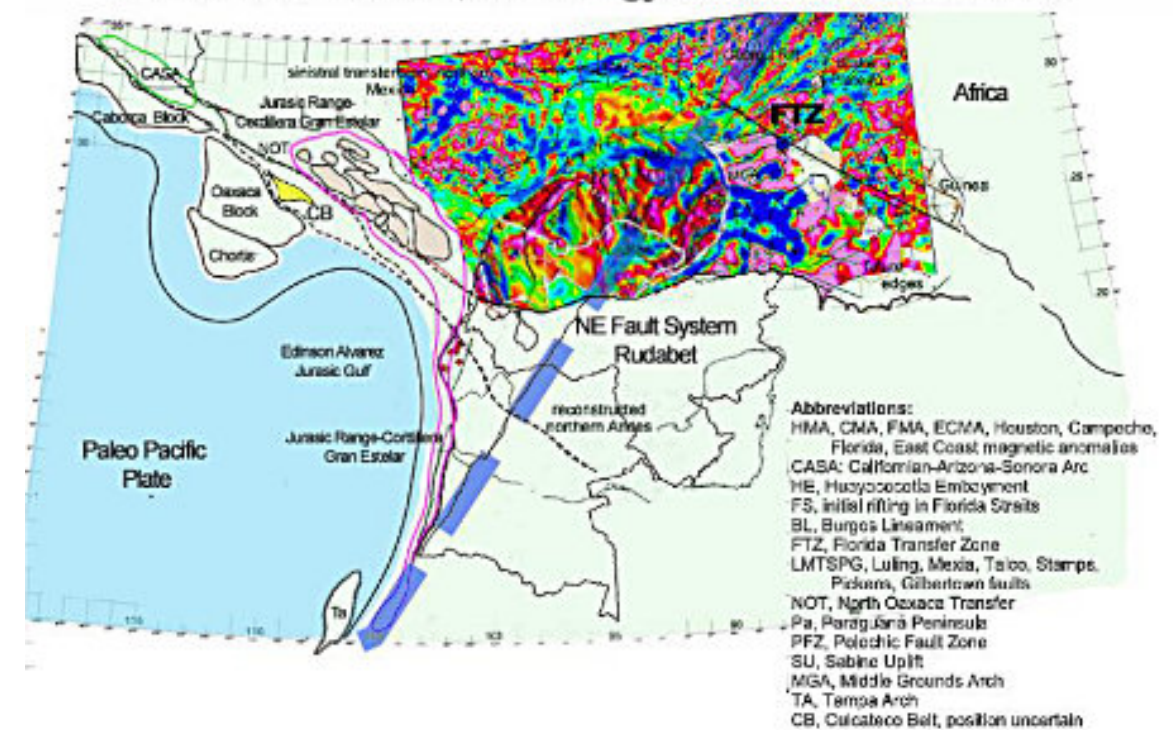


Figure 1. Main Geological, Morphological and Tectonic-Structural Features for Laurentia-Gondwana during the Late Triassic-Early Jurassic Period. 200-210 Ma.

Fig 2. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 167 m.a. Middle Jurassic
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.

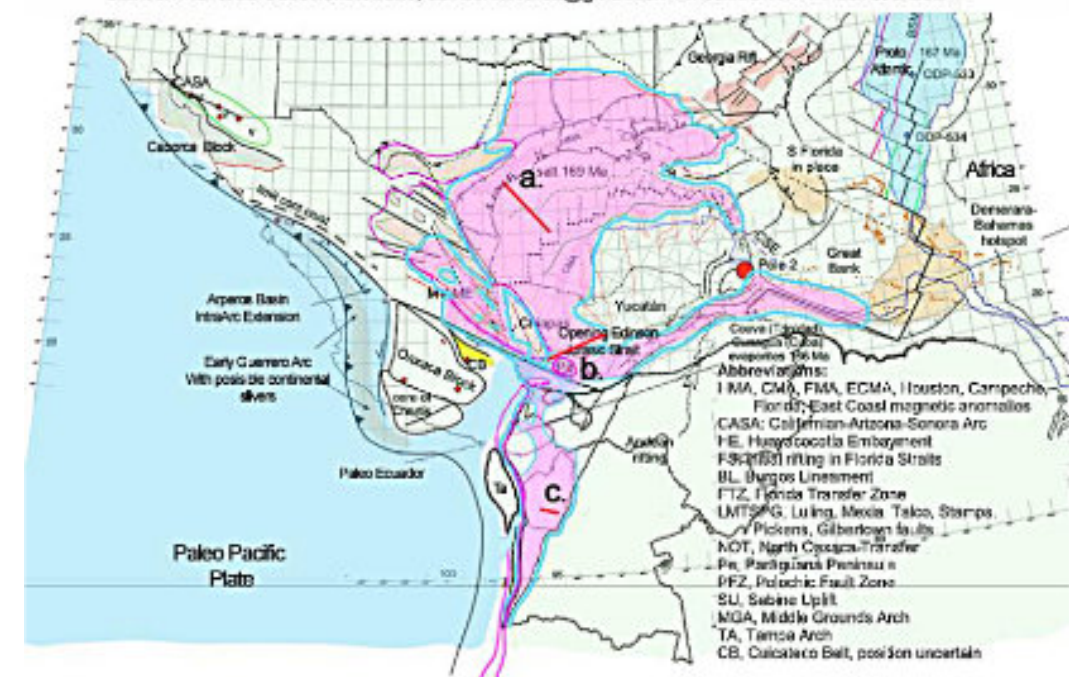


Figura 2. Location of the Seismic-Stratigraphic profiles in a. Gulf of America, b. Gulf of Mexico, c. Cundinamarca Basin-Colombia, Pink color corresponds to Salt Deposits for the period 170 to 166 m.a. approximately, (**Figure 16**)

2. Analysis

Using the advanced tools of Complex Source Theory (CST), it became very easy to find an answer to the question posed by the renowned geoscientists honored in this article, and which for decades has kept the community of geologists, stratigraphers, volcanologists, seismologists, geophysicists, geoscientists, and the global mining and energy sector in general up at night.

All the answers come from the paleogeographic reconstruction of the Gulf of Mexico based on the work of renowned geoscientists: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020, A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 49 p.** <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>, Free to the public through their YouTube conference **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021.**

and from the work of the **Doctors Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá.** <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>.

Logically complemented by information from studies conducted by important and recognized geoscientists described in the Bibliography, all integrated with the advanced tools of the **SCT Complex Source Theory (Edinson Alvarez 2025).** Results of the tectonic evolution of the Gulf of Mexico, which can be observed in **Figures 3,4,5,6,7,8** for the Late Triassic period (201.3 to 210 million years ago) – Jurassic. 145 to 201.3 million years ago.

In the following tectonic-paleogeographic reconstruction, Colombia's Tertiary deformation is restored (**Similar a Pindell 1985, V. Ramos 2021**). And the stretching of the Eastern Cordillera is consistent with the location of the western margin of the superimposed volcanic arc. The configuration of the Chibcha Block of **Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020**. Was used. All other parameters of the paleogeographic reconstruction were maintained, **Pindell et al 2020-2021**. The Late Triassic period was regenerated and/or configured based on **Pindell 1985-1992-1994-Pindell et al 2020-2021**.

The Salt Polygon for Colombia was developed based on the work of **Ingeominas 1970-1985 y el Dr. Oswaldo Ordoñez C. 2020**. Applying an equivalent stretch towards the middle Magdalena Valley. Presal sediments are not shown in this reconstruction, nor is the Tahami (Ta)-Colombia block discussed (Part of a forthcoming edition).

Based on the analysis of the Paleogeographic Reconstruction Tectonic Evolution of the Gulf of Mexico, we begin to answer the different questions raised in the following section of Giants to Be Knocked Down.

Additionally, one of the objectives of this work is to demonstrate the spatio-temporal relationship of the sedimentary deposits of the Jurassic Period of the Gulf of Mexico, with the sedimentary deposits of the same Jurassic period for the Colombian Basins, especially the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia.

Figures 3,4,5,6,7,8, tectonic evolution of the Gulf of Mexico during the Late Triassic period (201.3 a 210 m.a.)–Jurassic. 145 a 201.3 million years ago,

Fig 3. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 210-200 m.a. Late triassic-Early Jurassic
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.

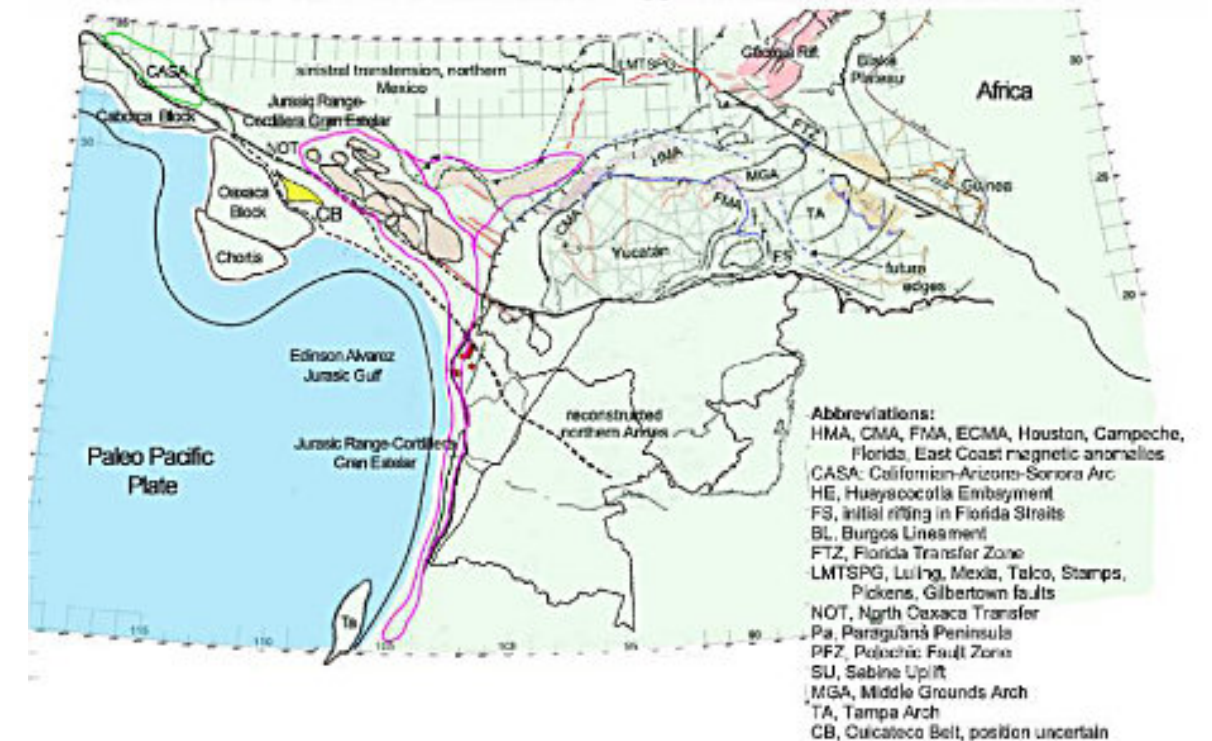


Fig 4. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 195 m.a. Early Jurassic
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.

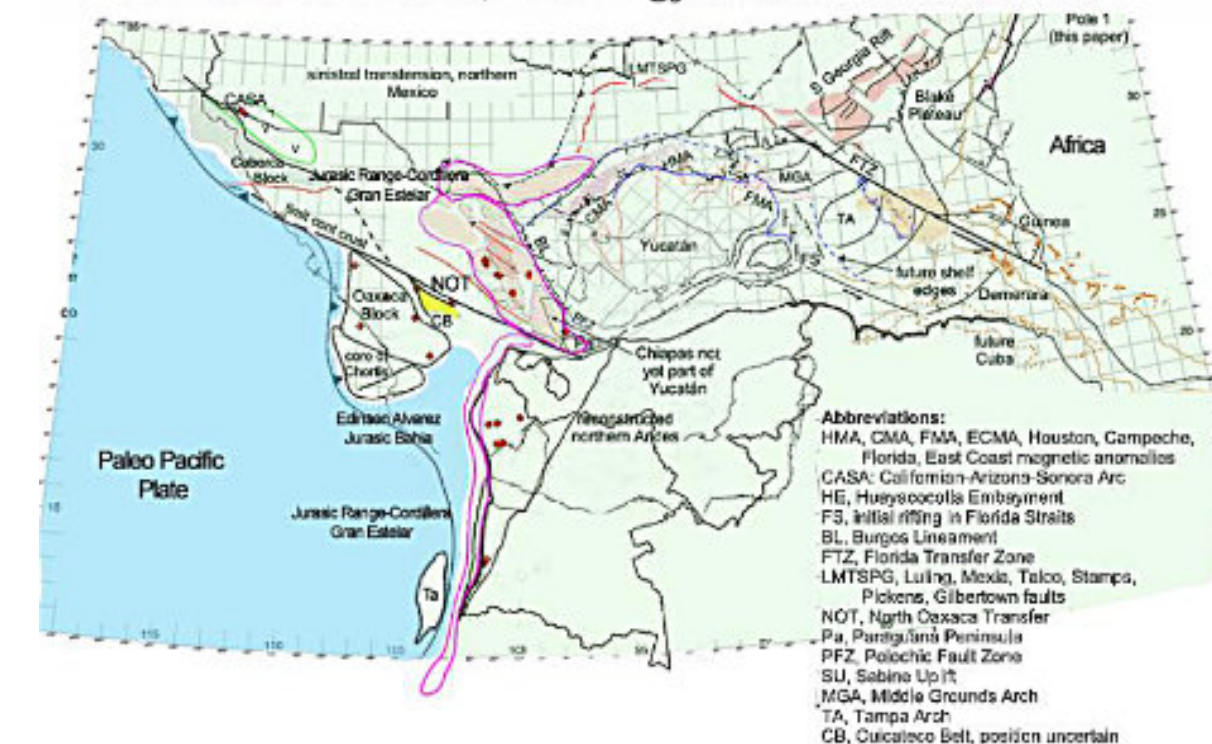


Fig 5. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 177 m.a. Early Jurassic
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.

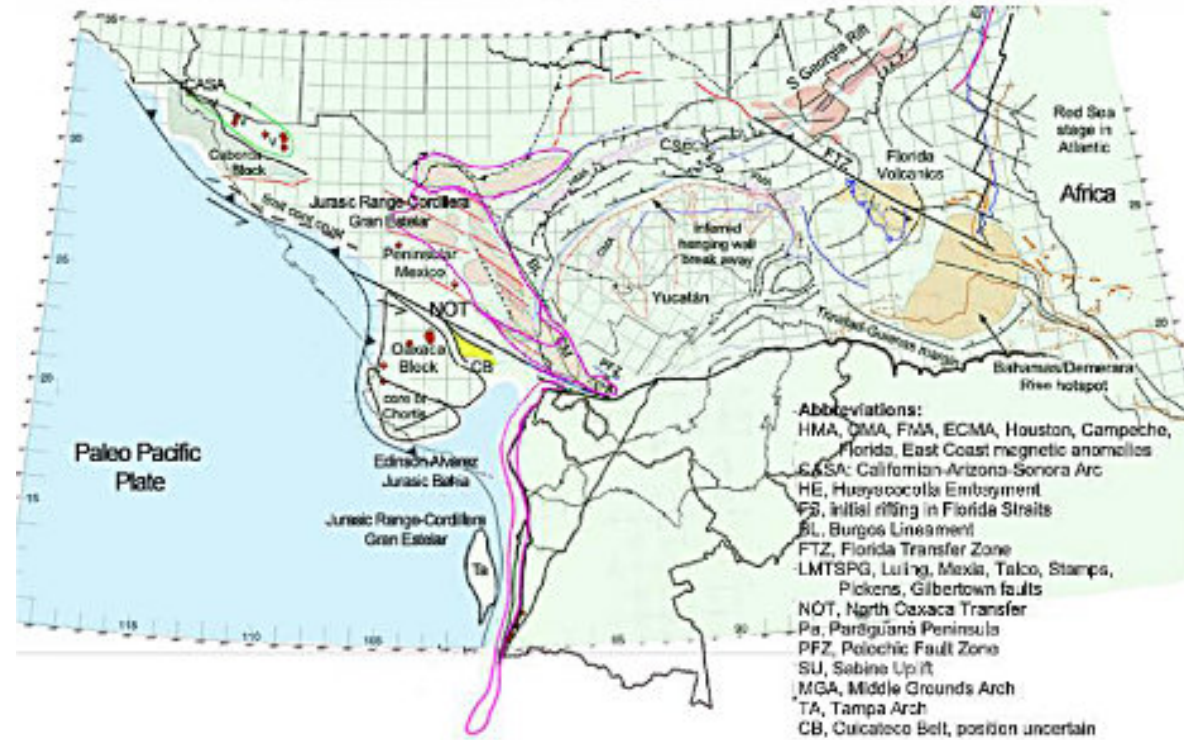


Fig 7. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 159 m.a. Late Jurassic
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



Fig 6. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 167 m.a. Middle Jurassic
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.

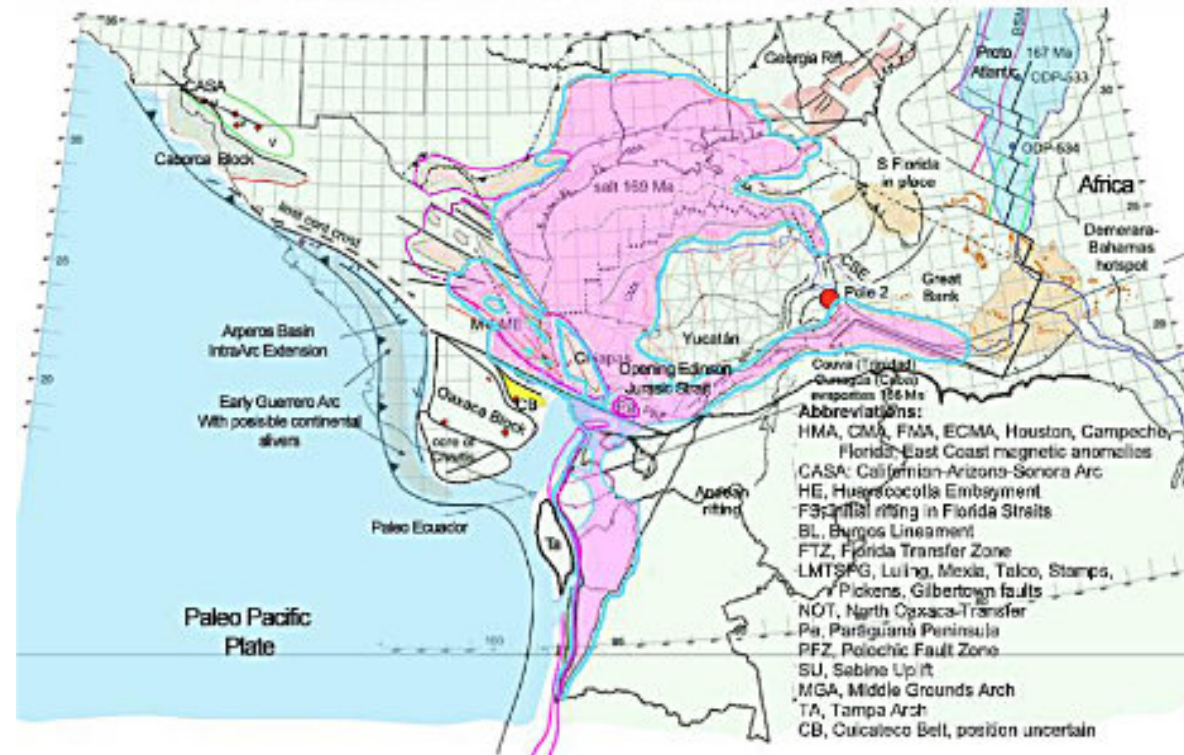


Fig 8. Mexican Gulf Tectonic Evolution - 154 m.a. Late Jurassic
Edinson Alvarez-Geoscientist 2025, edinson.alvarez@gmail.com . Modified from Pindell et al 2021.



3. Giants

The following are the Giants that we will demolish in this chapter. **We will refer to Giants as (Concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unresolved questions, etc.).**

3.1 Giant No.1 (Giant No. 8 Knocked Down this series), With more than 500 years of history, we will resolve it in the Conclusions of this work.

This corresponds to the questions by the Spaniards who arrived in Colombia in 1525 with the founding of Santa Marta, and later their entry into the interior of the territory, founding the city of Bogotá in 1538.

3.2 Giant No.2 (Giant No. 9 Knocked Down in this Series) :

Alarcón CM et al 2020. (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

3.3 Giant No.3 (Giant No. 10 Knocked Down in this Series):

Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021

evolución tectónica de México durante el Jurásico siguen siendo ampliamente debatidos. La dificultad en reconstruir con detalle la evolución tectónica del rift en México se debe principalmente a que resulta muy complicado identificar las fallas maestras que acomodaron la extensión continental durante el Jurásico. En efecto, los eventos tectónicos que caracterizan la historia geológica Cretácica

propuesta. Por consiguiente, el problema de traslape cortical sigue sin tener aparentemente una solución satisfactoria y aceptada de manera conjunta por la comunidad científica. A continuación, se

3.4 Giant No.4 (Giant No. 11 Knocked Down in this Series):

Youtube Conference **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020).

Also, how well does a regional extension model for "Peninsular Mexico" fit the basement geology? We mentioned anatexis, mid-crustal unroofing on moderately sinistral NW-SE faults/shear zones prior to deposition, and crustal thinning to about 25 km to provide long-term accommodation for the Mesozoic section. Do these things stand up to more critical examination? Or, do we need to return to the Mojave-Sonora Megashear?

3.5 Giant No.5 (Giant No. 12 Knocked Down in this Series):

Filina et al 2022. (Irina Filina, James Austin, Tony Doré, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022.)

1) The nature of the Triassic redbed basin preceding GoM opening - whether these units represent a successor basin to the Ouachita Marathon orogeny or precursor rifting to GoM formation. The issue is tied to the challenge of identifying firm evidence of pre-breakup rifting, which is currently sparse compared to other rifted margins;

3.6 Giant No.6 (Giant No. 13 Knocked Down in this Series):

Filina et al 2022.

2) The timing of salt deposition with respect to the Middle Jurassic seafloor spreading - specifically whether the salt predated, was synchronous with, or just postdated the initial spreading;

subdivision. Where salt exists (Fig. 2a), seismic imaging of underlying (i.e., syn-opening) sequences is difficult. Whether salt was deposited during the last stages of continental rifting, over oceanic crust, and/or concurrent with the first stages of seafloor spreading, remains unclear.

3.7 Giant No.7 (Giant No. 14 Knocked Down in this Series):

Filina et al 2022.

3) Whether GoM opening was facilitated by magma-rich breakup associated with SDRs, or it was mantle-poor and resulted in exhumed mantle close to the ocean-continent boundary;

3.8 Giant No.8 (Giant No. 15 Knocked Down in this Series):

Filina et al 2022. (Irina Filina, James Austin, Tony Doré, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022.)

4) The related issue of continental restoration of pre-GoM crustal blocks. The newly mapped geological structures within and adjacent to the OCT, such as interpreted SDR complexes with adjacent presalt sedimentary basins and outer troughs, in addition to magnetic anomalies may further constrain tectonic reconstruction of the basin.

Pindell et al 2020-2021.

Two unresolved issues stand out as most significant. One is the tectonic process by which the highs and lows in the top-rift unconformity were created along the west Florida margin, which records ther-

3.10 Giant No.10 (Giant No. 17 Knocked Down in this Series):

Pindell et al 2020-2021.(James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020).

Florida Peninsular Arch and hence may terminate against a poorly understood ‘Florida Transfer Zone’ (Erlich and Pindell 2020). The second issue

3.11 Giant No.11 (Giant No. 18 Knocked Down in this Series):

In Colombia, the oil sector and the geoscientific world have traditionally assumed that the salt corresponds to Lower Cretaceous deposition.

Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021

➤ Se propone un desacople entre la secuencia basal interpretada como Paleozoica y los pliegues observados en superficie, debido a la formación salina del Cretácico Inferior.

3.12 Giant No.12 (Giant No. 19 Knocked Down in this Series):

Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021

Un problema por resolver...

Hasta la fecha, entre la Sabana de Bogotá y el Páramo de Sumapaz no hay un modelo tectónico actualizado que tenga en cuenta las principales características del estilo estructural y proporcione argumentos para definir el rol de la sal y la cronología del plegamiento.

Answers can be found in the Final Conclusions of this study.

4. Spatiotemporal Relationship of Sedimentary Deposits During the Jurassic Period of the Gulf of Mexico with Respect to the Jurassic Sedimentary Deposits of the Colombian Basins.

4.1 Paleogeographic Correlation

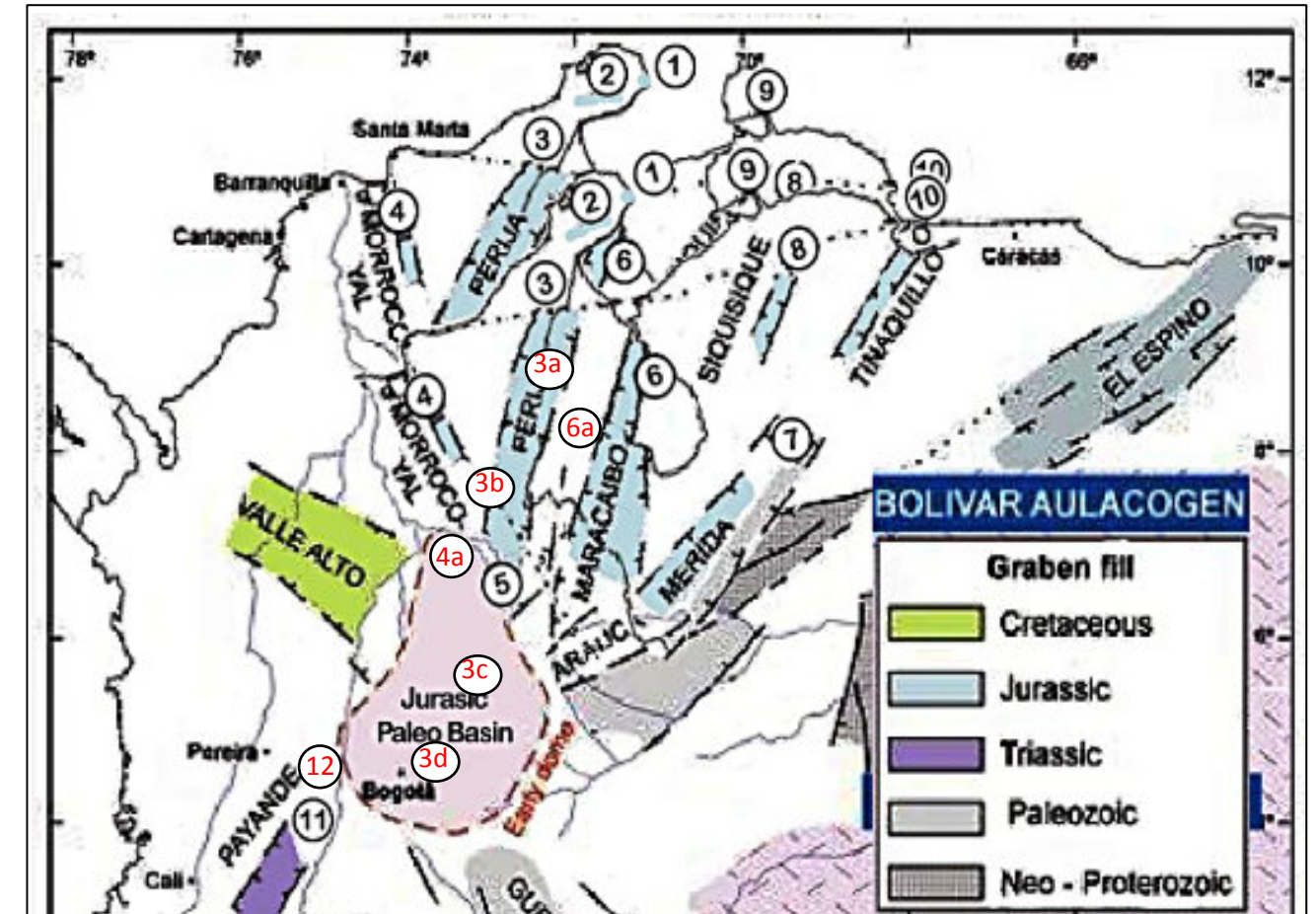


Figure 9. Approximate paleogeographic map of Colombia showing the main structures by geological age. Numbers 1 to 4 (including sub-items) correspond to Jurassic marine sedimentation. Stations 3C, 4, and 5 show erosion in the stratigraphic column during the Lower and Middle Jurassic periods. See supplementary **figures 10, 11, 12, 13, 14, 15, and 16.**

Figures 9 y 11. Modified from Fabio Cediél, Robert Peter Shaw 2019. (Compiled after Bartok et al. (1985), Sung Hi Choi et al. (2017), Geyer (1973), Cediél (1969), Maze (1984), Mendi et al. (2013), Schubert (1986), Leal-Mejía et al. (2018), Edinson Alvarez (2025))

4.2 Chronostratigraphic-Sedimentological Correlation

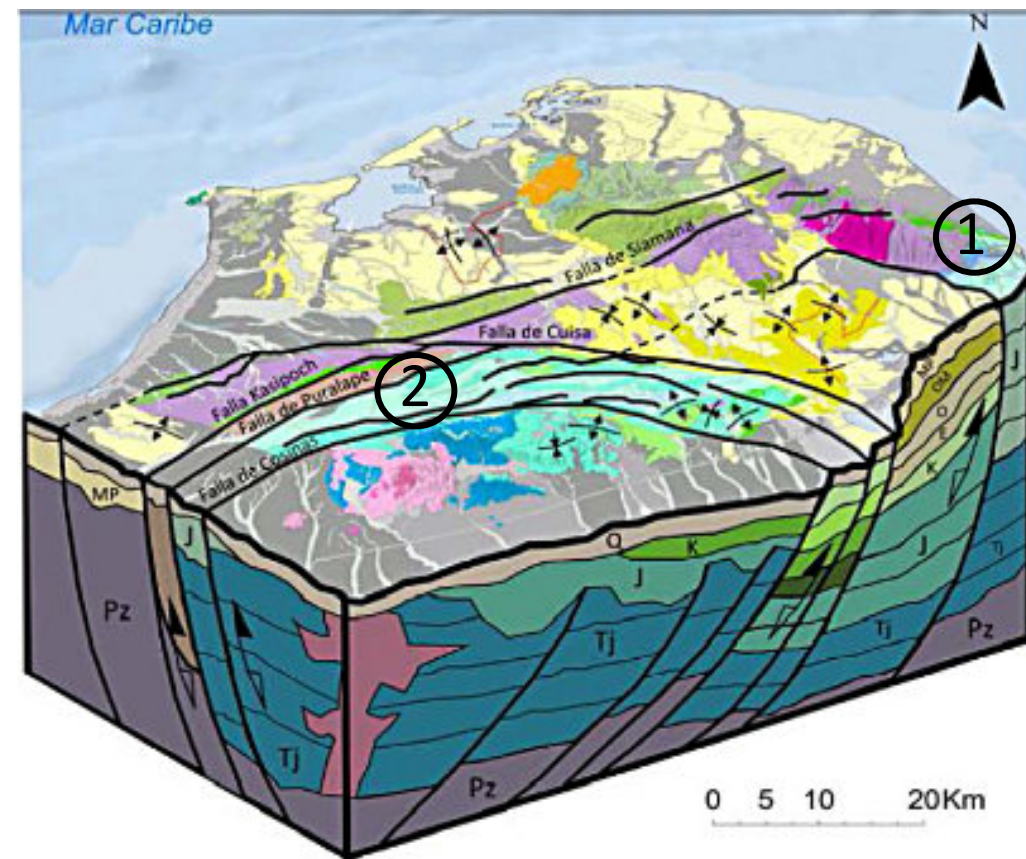


Figure 10. 3D geological map of the Guajira Peninsula, Colombia, showing Jurassic marine sedimentation. ANH-UPTC 2024. And the direction of deformation-erosion of the Jurassic deposits. 1. Serranía Macuira 2. Serranía Cosinas.

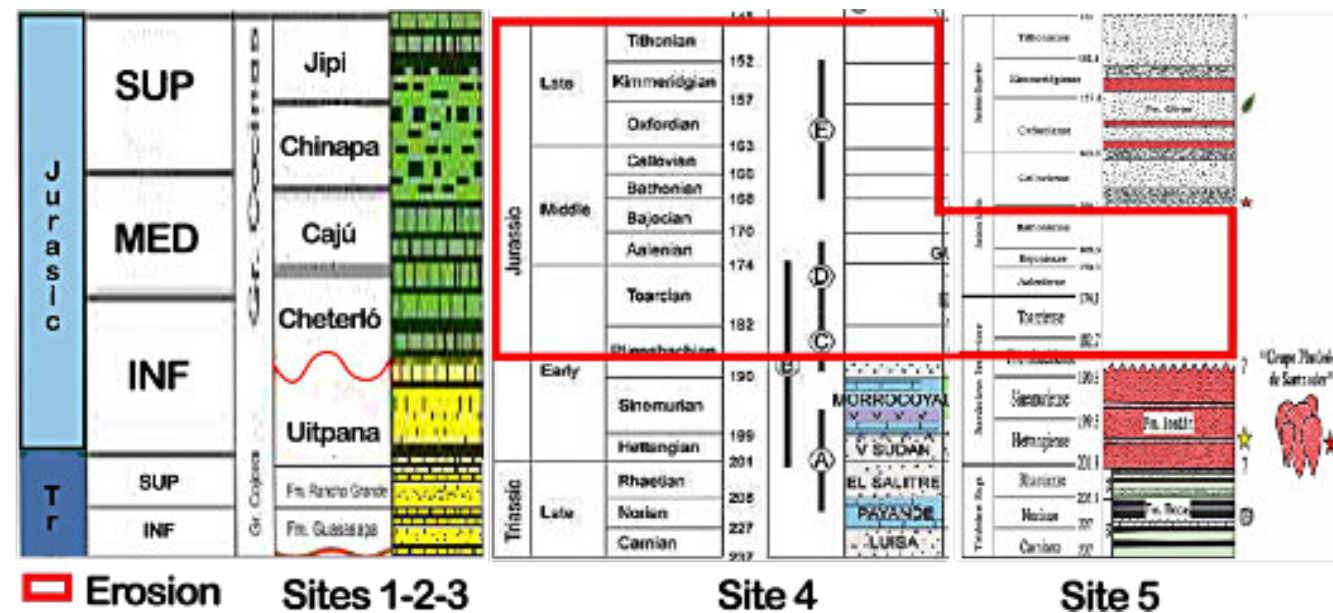


Figure 11. Stratigraphic Columns of the Triassic-Jurassic, stations 1-2-3-4-5 Sector of the Santander Massif, Sierra Nevada de Santa Marta-Guajira and Perijá, Colombia. Modified from ANH-UIS-2008, Fabio Cedié, Robert Peter Shaw 2019, Alarcon CM et al 2020. Location figures 9 and 10.

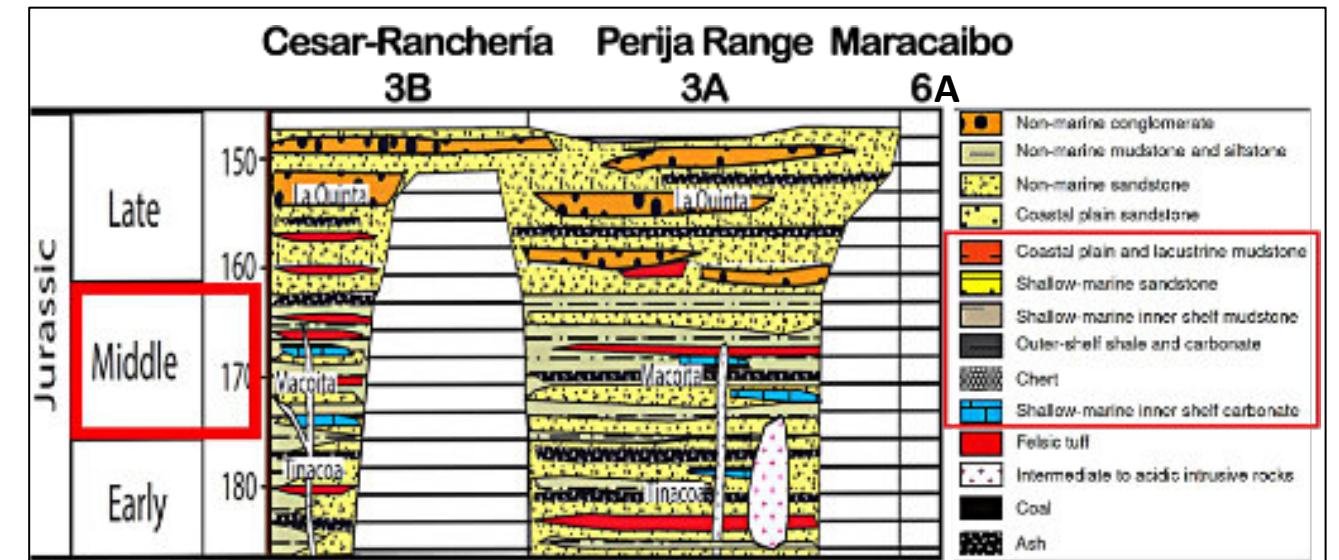


Figura 12. Jurassic Stratigraphic Columns, Exclusive Marine Deposition in the Middle Jurassic, Salt Deposition Time. Stations 3A-3B-6A, Location Figure 9. Serranía de Perijá Sector, Cesar Ranchería and Maracaibo Basin. Modified from Sanchez, Javier and Paul Mann, 2015. Stratigraphic data were compiled from Miller (1962), Forero (1970), Caceres et al. (1980), Kellogg (1984), Maze (1984), Parnaud et al. (1995), Mann et al. (2006), Vence (2008), and Ayala (2009).

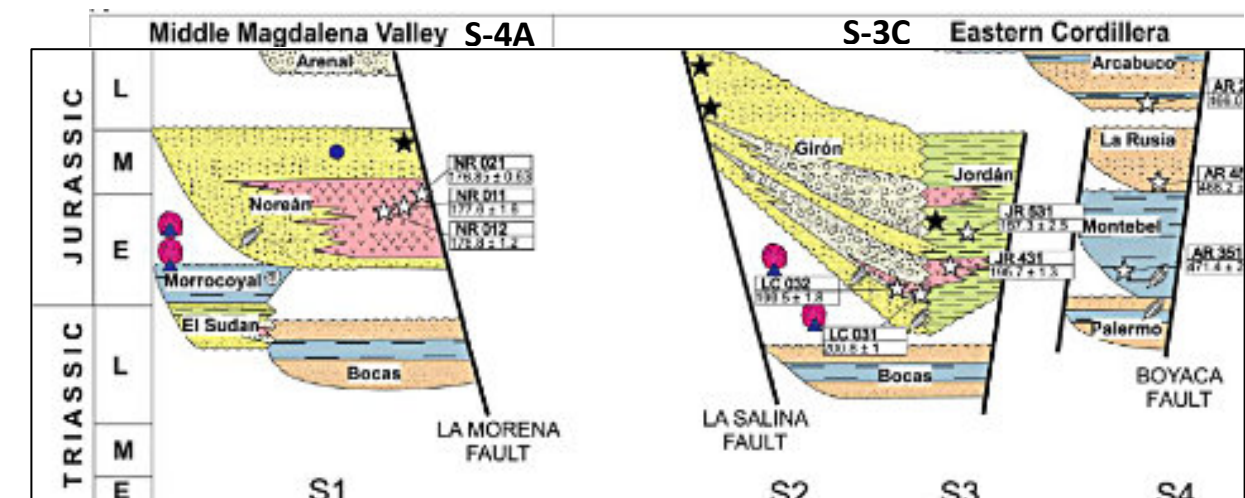


Figura 13. Stratigraphic Columns of the Triassic-Jurassic, stations 4A and 3C figure 9. Modified from Martin Reyes et al 2024 (Data compiled from Renzoni (1962), (1967), Cedié (1968), Cooper et al. (1995), Clavijo (1996), Mojica et al. (1996), Sarmiento (2001), Sarmiento-Rojas et al. (2006), Kammer and Sanchez (2006), Mora et al. (2006, 2009, 2013), Clavijo et al. (2008), Caballero et al. (2013), Horton et al. (2010, 2015), Moreno et al. (2013), Bayona et al. (2020), Rodriguez-Garcia et al. (2020). Central Axial Zone paleobasin Eastern Cordillera of Colombia (Boyaca Fault-Soapaga Fault).

When performing the tectonic restoration of Colombia for the Jurassic period, stations 1,2,3,4,5 (Figure 9), Sierra Nevada de Santa Marta, Baja-Alta Guajira, Cesar Ranchería and Serranía de Perijá, descend to the height of the Gulf of Maracaibo, putting all these structures in direct contact (**Perijá Graben, Cesar Ranchería, Bucaramanga Fault, closer to the paleobasin Eastern Cordillera of Colombia**), which are proposed as corridors through which the Jurassic sea of the Pacific Ocean entered to fill the Paleobasin of the Eastern Cordillera (Figure 9).

From the analysis of the previous stratigraphic columns (Figures 9, 10, 11, 12, 13), the following conclusions can be drawn: **There were two Jurassic corridors of influx waters from the Pacific Ocean** that flowed respectively into the paleobasin of the Eastern Cordillera in Colombian territory:

1. **Marine Lower Jurassic Corridor:** Corresponding to marine deposits in locations adjacent to the western Sierra Nevada de Santa Marta, the Middle Magdalena Valley (Morrocoyal Formation), and the axial portion of the Eastern Cordillera paleobasin (Montebel Formation), locations 4-4a-3c (Figures 9, 11, and 13). These deposits are capped by a late Middle Jurassic unconformity that erased or eroded the Middle Jurassic stratigraphic column. These events are related to block uplift associated with the Bucaramanga Fault, the Boyacá Fault, and the Soapaga Fault, factors that controlled Jurassic deposition in their area of influence.
2. **Marine Middle Jurassic Corridor:** This corresponds to the marine deposits of the Macoita Formation, Cheterló-Cajú-Chinapa, of the Middle Jurassic, located in the Upper Guajira, Lower Guajira, Serranía de Perijá, Cesar Ranchería corridor, extending to the Bucaramanga fault and the periphery of the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. Locations 1, 2, 3, 3a, 3b Figures 9, 10, 11, 12.
3. Figures 9, 10, 11, 12, and 13 clearly show structural control of Jurassic deposition through the arrangement of sediments on adjacent horsts and grabens in an approximately northeast-southwest direction. Within the structural highs, no deposition and/or erosion is observed, while the missing depositional sequence appears in the adjacent grabens (Figure 12). Note also that in Figure 13, a large area appears uplifted and/or eroded, leaving the presence of Lower and Middle Jurassic deposition uncertain.
4. The previous uncertainty is resolved by the deposition of the sequence at the 3d location shown in Figures 9, 14, and 16. The existence of the stratigraphic sequence (Figure 16C) indicates that Jurassic corridors 1 and 2 were active during the Jurassic period, feeding the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, consistent with the structural orientation of the rift (horst and graben northeast-southwest direction) and the positive slope direction (greater depth and subsidence towards the Bogotá-Cundinamarca Basin area). Figures 9 and 14.
5. There is a possibility of a third corridor for Colombia, called the **Independent Milenar Jurassic Strait:** a rupture or strait created southwest of the Cundinamarca Basin (southwestern part of the Eastern Cordillera paleobasin) controlled by the Ibagué Fault (Figure 14). This corridor fed the Eastern Cordillera Jurassic paleobasin through the Ibagué Fault corridor, as shown in Figures 9 and 14. It most likely crossed the volcanic arc, creating the channel for water to enter the basin. However, there is no sedimentary record as such in this area, most likely due to the uplift of the Central Cordillera and subsequent erosion of the sequence. (Discussion of the Cajamarca Complex, next edition).

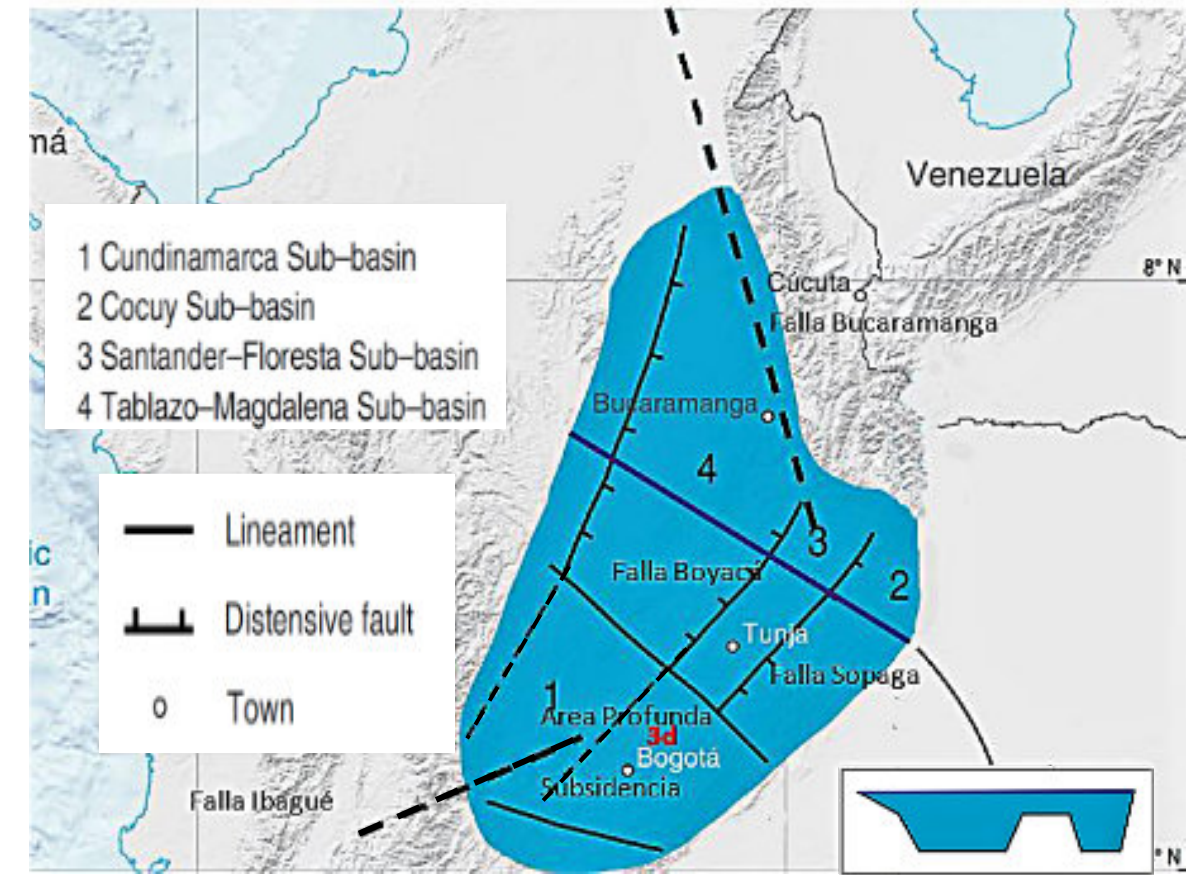


Figure 14. Approximation of Structural Elements of the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. Modified from Patarroyo, P. 2020, (Without reconstruction). The blue area represents a very general outline of the paleobasin. 3d approximate location intersecting the seismic line of the Figure 2 y 16c.

4.3 Paleontological Correlation

The known Jurassic sedimentary deposits in Colombia are primarily continental-fluvial-volcanic, poorly dated, and belong to the Girón Formation. However, the study presented by **Alarcón Gómez, C. M., et al. (Estratos-UIS-2019)** identified a new fossiliferous horizon containing the fern species **Phlebopteris polypodioides**, identified by Pons (1982). This discovery allowed researchers to assume a Late Jurassic age for the section found in the Lebrija River. The study also indicated a wide geographic distribution of this species along the equator, with similar deposits also found in countries such as Mexico, Cuba, Honduras, and Egypt during the same period (Figure 15).

Although the preceding paleontological analysis corresponds to the Late Jurassic, it clearly indicates the proximity and similarity of paleoclimatic conditions between northwestern South America and southern North America (Mexico-Honduras). Providing evidence of proximity within the entire work of reconstruction and tectonic evolution of the Gulf of Mexico, a central part of this article.

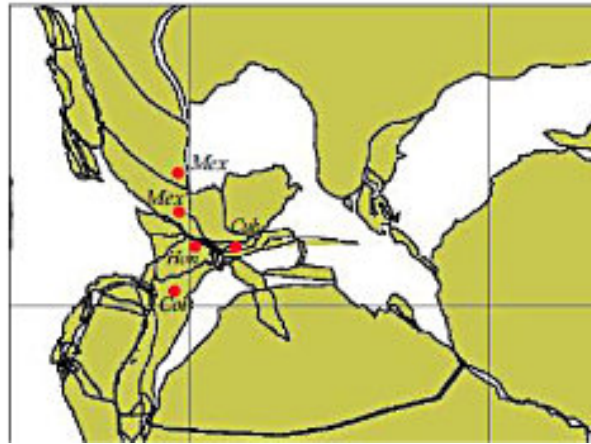


Figure 15. Geographic distribution of the *Phleboteris polypodioides* fern. Modified from **Alarcón Gómez, C. M, et al. Estratos-UIS- 2019.**

4.3 Morphological, Sedimentary, Chronological and Structural correlation

To complete our spectacular, wonderful and cinematic journey through the Colombian Jurassic period, we arrive at the **3d station figures 2, 9 and 16.**

Here, all the pieces, tests, and evidence that confirm our marvelous journey come together, from the tectonic reconstruction and evolution of the Gulf of Mexico developed in **Figures 3 to 8**, with the opening of the **Edinson Strait** and the deposition of the Salt in the Middle Jurassic (**Figure 6**) both in the Gulf of Mexico and Colombia; the paleogeographic reconstruction and evolution of Colombia for the Jurassic period (**Figure 9**), which demonstrate the proximity of the main structures, the Perijá Rift, Cesar Ranchería, and the Bucaramanga Fault, to the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia. The evidence of the existence of marine deposition from the Lower and Middle Jurassic (before and during the deposition of the Salt) through these channels—the Serranía de Cosinas-Macuira (Upper and Lower Guajira), the Perijá Rift, Cesar Ranchería and the Bucaramanga, Boyacá, and Soapaga Faults (**Figures 9, 10, 11, 12, 13, 14**); Additional paleontological evidence of the proximity of the territories (**Figure 15**), culminating in the great salt deposition event in the Cundinamarca Basin (South of the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera) **Figures 2, 6, 9, and 16.**

According to studies and numerical models, the salt was deposited rapidly, reaching a thickness of 3 km in one million years. **Filina et al 2022.**

It is believed that the salt was deposited very rapidly, in less than a million years (e.g., Warren, 2006). This estimate is consistent with numerical modeling of salt deposition in the South Atlantic (Montaron and Tapponnier, 2010), and also with estimates from stratigraphy of the Santos Basin, Brazil (Dias, 2005). The hypothesis of rapid deposition also matches modern rates from the few regions of current salt deposition (see Davison et al., 2012) and with the known ~640,000-year duration of up to 3 km thick Messinian salt deposition in the Mediterranean (e.g., Krijgsman et al., 1999). If GoM salt deposition was

From the analysis of the items in section 4.0 above, we can conclude that we have identified two new unexplored plays and/or petroleum systems in the Cundinamarca Basin, belonging to the Jurassic paleobasin of the Eastern Paleocordillera of Colombia.

1. **Jurassic Play:** Formed by the deposition of organic shales from the Lower Jurassic - Hypothetical **Zipa Formation** of Edinson Alvarez 2025 (Source Rock) contemporaries with Morrocoyal and Montebel formations. Interdigitated towards the edges of the Basin with detrital volcanosedimentary, slope deposits, debris flows, turbidites (Reservoir Rock) and a 3 to 4 km seal of salt deposited during the Middle Jurassic.
2. **Cretaceous play associated with salt seal:** Source Rock: Fómeque Formation, Reservoir Rock: Une Formation, Seal Rock: Migrated Salt. The same applies to higher sequences.

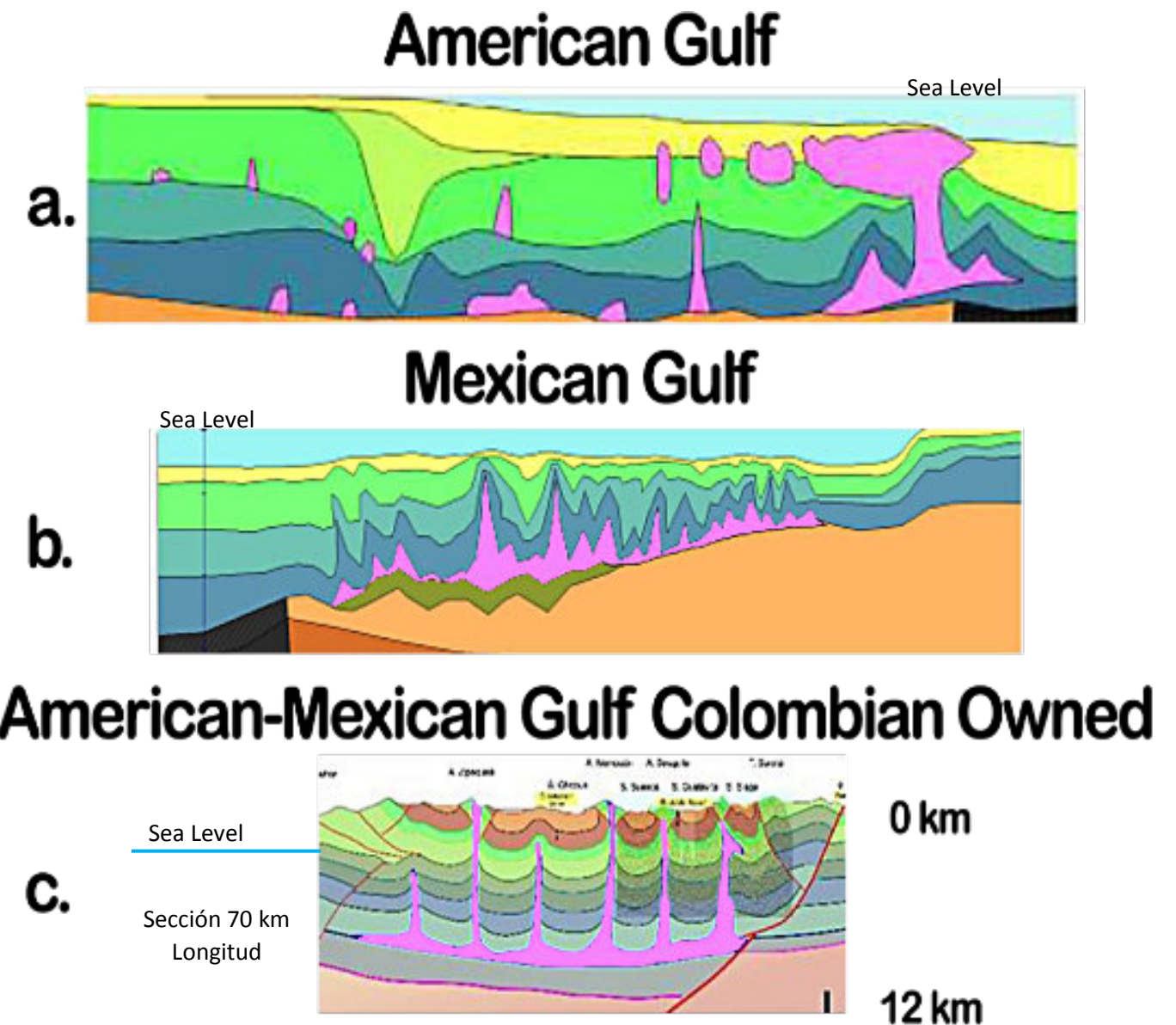


Fig. 16. Comparative Salt Structures, Depth Sediments , and Basins, American Gulf-MexicanGulf-Cundinamarca Basin (Colombia)

Modified From Irina Filina and Erin Beutel. 2022. Y ANH-UPTC 2020. Location Figure 2,14-3d.

Figure 16 is the key evidence for the previous interpretations. **The Great Chibcha Terrane of Restrepo and Toussaint (2020)** constitutes, according to this study, the westernmost part of the large continental structural escarpment of Laurentia (**Figures 1 and 3**). It is closed to the south by the **Great Rudabet Rift-Lineament System (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt, Father. Figure 1)**. It occupies approximately one-third of the size of the basin that gave rise to the Gulf of Mexico-Gulf of America (including the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia) during the Jurassic period. In the Bajocian-Bathonian period (170-166 Ma, Middle Jurassic), the Edinson strait opened **Figure 6**, made up of three openings **Edinson strait North, JhonEdi strait center, Floris Strait South, an optional independent Milenar Strait at southwest from** Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, where the Pacific Ocean flowed and entered to fill the paleobasins of the Gulf of Mexico (Gulf of Mexico-Gulf of America) and paleobasin of the eastern mountain range of Colombia, depositing the salt existing in the basin, key to the development and origin of the World Class petroleum systems of the Gulf of Mexico-Gulf of America.

The separation of the South American continent (Colombia-Venezuela, among others) from Laurentia continued after the aforementioned events, with the Gulf of Mexico basin and the Eastern Cordillera paleobasin taking different paths, moving away from each other. Subsequently, the incursion of the Cretaceous sea generated different events for each basin. While the Jurassic to Recent sedimentary basins remain submerged in the Gulf of Mexico, the Eastern Cordillera paleobasin developed and underwent Eocene-Miocene and subsequent uplift events, raising the sedimentary sequence 2,500 meters above sea level, with the city of Bogotá serving as a primary reference point. (**Figures 9, 14, and 16**)

To continue correlating the Gulf of America-Gulf of Mexico basins and the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, we will review the similarity of the interpretation of the Seismic Sections made in the works of **Irina Filina and Erin Beutel. 2022. Y ANH-UPTC 2020. We can observe the following aspects that they have in common:**

- 1- Thickness of the Sedimentary Sequence 8 to 14 km (General 10 km) **Figura 16.**
- 2- Thickness of the salt sequence 3-4 km. (**Figura 6-16**)
- 3- Structural deformation of the salt sequence (Extending almost and in some cases the entire sedimentary sequence. For this to occur, not only is active tectonic deformation needed, but also a powerful salt deposit, in this case close to 3-4 km) **Figura 16.**
- 4- Paleogeographic point of common origin. (**Figura 1 y 3**)

In Colombia, the oil sector and the geoscientific community have traditionally assumed that the salt corresponds to Cretaceous deposition, as shown on all chronostratigraphic maps of the country up to 2025. However, there are several points that do not support this thesis and, on the contrary, contradict this theory, among them are:

- 1- Since the Cretaceous play is one of the most studied and drilled in the country due to the interest in its petroleum systems, there is no significant report of salt or saline deformation in the Llanos basin, Catatumbo, upper-middle Magdalena valley, Maracaibo Basin, where Cretaceous deposition was also recorded.
- 2- The Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia has been little studied and almost unexplored, according to **ANH-UPTC 2020.**

La cuenca Cordillera Oriental es una de las cuencas frontera colombianas que mayor interés exploratorio a generado a lo largo de los últimos 25 años. Este interés condujo al descubrimiento de hidrocarburos en los campos Gibraltar, Bolívar, Corrales y Guando. Sin embargo a pesar de estos campos con producción comercial teniendo en cuenta el tamaño de la cuenca, la cantidad de sísmica disponible y el número de pozos exploratorios se trata de una provincia geológica inexplorada.

- 3- The few wells drilled in the Eastern Cordillera basin of Colombia mostly only reach the Cretaceous sequence, leaving the Jurassic record unknown. This is especially true in the Cundinamarca basin.

The existence of the aforementioned phenomenon regarding Jurassic salt in Colombia is not merely anecdotal, but has an impact that has not been widely related and studied on the **Petroleum, Mining, and Social Systems of the area.**

Implications of Jurassic Salt in Colombia's Petroleum, Mining, and Social Systems.

Implications of Jurassic Salt in Petroleum Systems.

Having demonstrated in this article the origin of the salt existing in the stratigraphic sequence of the Eastern Cordillera of Colombia, the following impacts are generated.

We can conclude that we have identified two new unexplored plays and/or petroleum systems in the Cundinamarca Basin, belonging to the Jurassic paleobasin of the Eastern Paleocordillera of Colombia.

1. **Jurassic Play:** Formed by the deposition of organic shales from the Lower Jurassic - Hypothetical **Zipa Formation** of Edinson Alvarez 2025 (Source Rock) contemporaries with Morrocoyal and Montebel formations. Interdigitated towards the edges of the Basin with detrital volcanosedimentary, slope deposits, debris flows, turbidites (Reservoir Rock) and a 3 to 4 km seal of salt deposited during the Middle Jurassic.
2. **Cretaceous play associated with salt seal:** Source Rock: Fómeque Formation, Reservoir Rock: Une Formation, Seal Rock: Migrated Salt. The same applies to upper sequences.

Implications of Jurassic Salt for Mining Systems

Salt has been important since pre-Hispanic times for the development of indigenous cultures and later during the colonial period after the Spanish conquest. Few salt mines are currently operational, and most are not technologically advanced. Salt springs are abundant in the eastern mountain range basin.

But the most notable and worthy fact in this article is the role of salt and its participation in the mixing of hydrothermal fluids that gave rise to the eastern (Cretaceous age) and western (Oligocene age) emerald belts of the Eastern Cordillera of Colombia (age debate) (**Andres M. Ravelo 2020**). According to **Andres M. Ravelo (2020)**, some trace elements, such as the V/Cr ratio, and trace elements like Fe, Na, and Mg, help differentiate the beauty, color, and brilliance of Colombian emeralds. (Sodium is probably contributed by salt, among other minerals.) This distinguishes Colombian emeralds from others around the world. (**Figure 17.** Fura, one of the largest rough emeralds in the world - Muzo - Boyacá, Colombia. Tablazo Sub-basin, **Figure 14**).



Figure 17. Fura, one of the largest rough emeralds in the world - Muzo - Boyacá, Colombia. Taken from <https://www.las2orillas.co/el-dia-en-que-victor-carranza-encontro-a-fura-una-de-las-esmeraldas-mas-grandes-del-mundo/#>

Implications of Jurassic Salt in Social Systems.

The largest and most important salt dome in Colombia, located in the city of Zipaquirá, Cundinamarca, houses the **underground Salt Church**, one of the most important in the world. **In 2024, it received over 700,000 tourists.** (Figure 18. Note from the newspaper El Tiempo, 2025; Figure 19. Facilities of the Zipaquirá Salt Church). It is boosting the economy of the region and the country.



Figure 18. Record number of tourists visit the Salt Church of Zipaquirá. Article from El Tiempo newspaper, 2025.

<https://www.eltiempo.com/bogota/mas-de-700-000-turistas-visitaron-la-catedral-de-sal-de-zipaquirá-en-el-2024-3415793>



Figure 19. Facilities of the Salt Church of Zipaquirá. Taken from <https://www.catedraldesal.gov.co/>.

DISCUSSION

This work unlocks several existing limitations in the geoscientific world related to the tectonic evolution of one of the main oil sources in the world, the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico) and in parallel the Jurassic petroleum system of the Colombian basins.

One of the main geological features is **the discovery of the Rudabet Great Fault System-Lineament (Honor to Ruben Dario Alvarez Betancourt (Father), Figures 1 and 3)**. This system controls the base of the large continental structural scarp of Laurentia (Figure 3). This discovery helps resolve several contemporary questions, which are central to this study, and which address uncertainties raised by leading geoscientists worldwide.: **James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020-2021; Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021; Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG.2020; Irina Filina, James Austin, Tony Dor'e, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022. And others.** This feature demonstrates that the **Restrepo and Toussaint 2020 Chibcha Terrane constitutes**, according to this study, the westernmost part of the large Laurentian structural escarpment (Figure 3). It occupies approximately one-third of the size of the basin that gave rise to the Gulf of Mexico-Gulf of America (including the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia) during the Jurassic period.

Although improvements, refinements, and modifications can be made to the proposal presented in this study, the fact remains that the perfect tie-up obtained through **the Rudabet Fault-Lineament System (Honor Ruben Dario Alvarez Betancourt-Father., Figures 1 and 3)** is and will be the starting point for future reconstructions of tectonic evolution forward or backward from this tie-down point or constraint in geological time. The issue that still warrants review is determining whether this tie-down point corresponds to the 200 Ma age of the Dr. Pindell et al. 2020-2021 model, or to a slightly earlier age between 200 and 210 Ma. This would require considering the travel velocities of the Chortis-Oaxaca blocks and their implications for past reconstructions, a topic beyond the scope of this work.

In Colombia, the oil sector and the geoscientific community have traditionally assumed that the salt corresponds to Cretaceous deposition, as shown on all chronostratigraphic maps of the country up to 2025. However, there are several points that do not support this thesis and, on the contrary, contradict this theory, among them are:

- 1- Since the Cretaceous play is one of the most studied and drilled in the country due to the interest in its petroleum systems, there is no significant report of salt or saline deformation in the Llanos basin, Catatumbo, upper-middle Magdalena valley, Maracaibo Basin, where Cretaceous deposition was also recorded.

- 2- The Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia has been little studied and almost unexplored, according to **ANH-UPTC 2020**.
- 3- The few wells drilled in the Eastern Cordillera basin of Colombia mostly only reach the Cretaceous sequence, leaving the Jurassic record unknown. This is especially true in the Cundinamarca basin.
- 4- The analysis of the facts, indications, evidence, and previous records clearly shows us that while the Cretaceous transgression to the South American continent has been widely studied and analyzed, we find that the entry of the sea or flooding into the territory was extensive and massive, that is, there was direct communication with the open sea, therefore there were normal salinity conditions unsuitable for the deposition of salt.. While the analysis of the facts, clues, evidence, and records provided in this work demonstrates that during the Middle Jurassic period (**Bajocian-Bathonian, 166-170 Ma**), the Naza Arch of Mexico was in collision with the northwestern corner of South America (Gondwana), breaking the Jurassic Great Estelar Ridge, creating the Edinson Strait (Edinson Strait-Noth, JhonEdi Strait–Center, and Floris Strait-South) entering the Pacific Ocean to flood the Gulf of Mexico (Gulf of America and Gulf of Mexico), also flooding the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, **Demonstrated by the marine corridors of the lower and middle Jurassic, defined from the stratigraphic columns 1,2,3,3a,3b,3d and 3d; 4, 4a, 3c, (later eroded), Figures 6,9,10,11,12,13,14,15,16.** This generated a restricted flow of seawater, causing low circulation and therefore hypersalinity, which, combined with the large extent of the Basin and the high atmospheric conditions of high temperatures, favored the rapid deposition of salt. (**Filina et al 2022**), which reached a thickness of 3 to 4 km. **We can clearly conclude that the salt from the Eastern Cordillera of Colombia is part of the same environment, time and conditions as those that formed in the Gulf of Mexico during the Middle Jurassic.**

The integration of knowledge developed through the Complex Source Theory (CST) and its various advanced tools allows us to shed light on and answer all the questions that, for more than five hundred years (the Spanish Conquest era) and one hundred years (the contemporary era), have troubled geoscientists and petroleum explorers regarding the tectonic, sedimentary, stratigraphic, and structural evolution of the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico and the paleo-Eastern Cordillera of Colombia). **Figures 1 to 16. (The same treatment has been applied to all other oil and mining basins in Colombia.)**

The answers become logical, simple, and gain value in light of Complex Source Theory (CST) and its tools, as you will see in the concluding part of this study.

If your company faces a highly complex geoscientific problem with significant economic implications, Complex Source Theory (CST) and its tools are here to solve it. For a more detailed analysis and solution to complex tectonic, structural, and stratigraphic problems, please consult with the author of this article.

CONCLUSION

The SCT Complex Source Theory and its advanced tools demonstrate their value in this report, contributing to the knowledge and understanding of the tectonic evolution of the Gulf of Mexico (Gulf of America-Gulf of Mexico and the Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia) during the Jurassic Period. This contributes to geoscientific knowledge and development, which will help guarantee the country's energy, economic, and social sustainability.

Through this analysis, we have demonstrated how the SCT's postulates have been corroborated and proven over time, revealing their predictive power. And in this article, dedicated to Miguel de Cervantes Saavedra and his work, **we verify the demolition of twelve (12) giants in the field (we will refer to giants as: concepts, techniques, technologies, methodologies, procedures, tools, uncertainties, unanswered questions, etc.).**

Giant No.1 (Giant No. 8 Knocked Down from this series):

This corresponds to the question the Spanish posed to the Indigenous people of the Colombian interior (Sabana de Bogotá) about the origin of the salt they traded in the region, given the absence of a nearby sea. **The Indigenous people's response** at the time was: (It comes from Mother Earth, from the interior of the Earth). **The scientific answer after 500 years of history by Edinson Alvarez-Geoscientist:** It comes from the marine deposition of the Gulf of Mexico (including the Gulf of America, Gulf of Mexico and Paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia), deposited in the Middle Jurassic period (Bajocian-Bathonian, 166-170 Ma).

Giant No.2 (Giant No. 9 Knocked Down from this series):

Alarcón CM et al 2020. (Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020).

de arcos magmáticos marginales (Rodríguez, et al., 2018). Uno de los retos actuales es la reconstrucción de la historia geológica del Jurásico en los Andes del norte, no solo desde el punto de vista geoquímico y geocronológico de las rocas plutónicas y volcánicas, sino porque deben entenderse de forma integral las relaciones del magmatismo con la formación de cuencas y la acumulación de sucesiones sedimentarias. Como lo sugieren Bayona,

Answer: The spatio-temporal relationship of subduction processes, the generation of volcanic-plutonic arcs, rifting, and basin filling and deposition is largely clarified, providing the general framework for subsequent and prior processes in the tectono-stratigraphic formation and evolution of Mexican, American, and Colombian basins during the Jurassic Period and part of the Late Triassic. (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mining exploration cycle, consult the author of this article.)

Giant No.3 (Giant No. 10 Knocked Down from this series):

Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021

evolución tectónica de México durante el Jurásico siguen siendo ampliamente debatidos. La dificultad en reconstruir con detalle la evolución tectónica del rift en México se debe principalmente a que resulta muy complicado identificar las fallas maestras que acomodaron la extensión continental durante el Jurásico. En efecto, los eventos tectónicos que caracterizan la historia geológica Cretácica

propuesta. Por consiguiente, el problema de traslape cortical sigue sin tener aparentemente una solución satisfactoria y aceptada de manera conjunta por la comunidad científica. A continuación, se

Answer: With this new proposal by **Dr. Edinson Alvarez (2025) (Modified from Pindell et al. (2020-2021))**, not only is the problem of crustal overlap between Mexico and Colombia (Laurentia-Gondwana) resolved, but a large number of questions related to the structural and stratigraphic tectonic evolution of the Gulf of Mexico during the Jurassic period are also answered. (For further details about the events and implications in the O&G&M exploration cycle, consult the author of this article.)

Giant No.4 (Giant No. 11 Knocked Down from this series):

Youtube Conference **Cátedra Selecta.- James Pindell-2021** (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020).

Also, how well does a regional extension model for "Peninsular Mexico" fit the basement geology? We mentioned anatectosis, mid-crustal unroofing on moderately sinistral NW-SE faults/shear zones prior to deposition, and crustal thinning to about 25 km to provide long-term accommodation for the Mesozoic section. Do these things stand up to more critical examination? Or, do we need to return to the Mojave-Sonora Megashear?

Answer: Regarding the question posed by **Dr. Pindell et al. (2020-2021)**, the answer is Adopt this new model with the corresponding adjustments, which resolves the majority of questions existing in the geoscientific community, as demonstrated by the supporting evidence of this research study. (For further details regarding the events and implications in the oil, gas, and mining exploration cycle, please consult the author of this article.)

Giant No.5 (Giant No. 12 Knocked Down from this series):

Filina et al 2022. (Irina Filina, James Austin, Tony Doré, Elizabeth Johnson, Daniel Minguez, Ian Norton, John Snedden, Robert J. Stern. 2022.)

1) The nature of the Triassic redbed basin preceding GoM opening - whether these units represent a successor basin to the Ouachita-Marathon orogeny or precursor rifting to GoM formation. The issue is tied to the challenge of identifying firm evidence of pre-breakup rifting, which is currently sparse compared to other rifted margins;

Answer: The Triassic Redbed Deposits are related to the two events mentioned: the final stages of the Ouachita-Marathon Orogeny and the opening of the Gulf of Mexico. (For further details about the events and implications for the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article.)

Giant No.6 (Giant No. 13 Knocked Down from this series):

Filina et al 2022.

2) The timing of salt deposition with respect to the Middle Jurassic seafloor spreading - specifically whether the salt predated, was synchronous with, or just postdated the initial spreading;

subdivision. Where salt exists (Fig. 2a), seismic imaging of underlying (i.e., syn-opening) sequences is difficult. Whether salt was deposited during the last stages of continental rifting, over oceanic crust, and/or concurrent with the first stages of seafloor spreading, remains unclear.

Answer: The solution to this problem is called the **EAST-P Method-Tool of the SCT (Processing and Seismic Treatment, Edinson Alvarez, 2025)**, which has been used to solve complex structural tectonic problems where seismic imaging is poor, to bad quality. See Articles 2 and 3 of this series. (For further details about the events and implications in the O&G&M exploration cycle, consult the author of this article.)

Giant No.7 (Giant No. 14 Knocked Down from this series):

Filina et al 2022.

3) Whether GoM opening was facilitated by magma-rich breakup associated with SDRs, or it was mantle-poor and resulted in exhumed mantle close to the ocean-continent boundary;

Answer: The initial opening phase of the Gulf of Mexico was Magma-Poor type, migrating to a Magma-Rich type event, with the continuous generation of oceanic crust, ending with the termination of the mantle feeder at the end of the Jurassic-Early Cretaceous. (For more details about the events and implications in the oil, gas, and mining exploration cycle, consult the author of this article.)

Giant No.8 (Giant No. 15 Knocked Down from this series):

Filina et al 2022.

4) The related issue of continental restoration of pre-GoM crustal blocks. The newly mapped geological structures within and adjacent to the OCT, such as interpreted SDR complexes with adjacent presalt sedimentary basins and outer troughs, in addition to magnetic anomalies may further constrain tectonic reconstruction of the basin.

Answer: Multiple authors and proposals for the location of blocks, the basis for reconstructing the tectonic evolution of the Gulf of Mexico, have been published; however, none is definitive, as they lack sufficient evidence to prevail over the others. This paper provides a solution to this problem, which has preoccupied geoscientists worldwide for over 100 years. (For further details regarding the events and implications of the oil, gas, and mineral exploration cycle, please consult the author of this article.)

Gigante No.9 (Giant No. 16 Knocked Down from this series):

Pindell et al 2020.

Two unresolved issues stand out as most significant. One is the tectonic process by which the highs and lows in the top-rift unconformity were created along the west Florida margin, which records ther-

Answer: The tectonic reconstruction in **Figures 3, 4, and 5** reveals the mechanism that triggered the development of these structures. (For further details on the events and implications of the oil, gas, and mining exploration cycle, please consult the author of this article.)

Giant No.10 (Giant No. 17 Knocked Down from this series):

Pindell et al 2020. (James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber 2020)

Florida Peninsular Arch and hence may terminate against a poorly understood 'Florida Transfer Zone' (Erlich and Pindell 2020). The second issue

Answer: In the tectonic reconstruction of **Figures 3, 4, 5**, one can better understand how Florida Transformation Zones (FTZ) work. (For further details about the events and implications in the O&G&M exploration cycle, consult the author of this article.)

Giant No.11 (Giant No. 18 Knocked Down from this series):

Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021

➤Se propone un desacople entre la secuencia basal interpretada como Paleozoica y los pliegues observados en superficie, debido a la formación salina del Cretácico Inferior.

In Colombia, the oil sector and the geoscientific community have traditionally assumed that the salt corresponds to Cretaceous deposition, as shown on all chronostratigraphic maps of the country up to 2025.

Answer: The analysis of the facts, indications, evidence, and previous records clearly shows us that while the Cretaceous transgression to the South American continent has been widely studied and analyzed, we find that the entry of the sea or flooding into the territory was extensive and massive, that is, there was direct communication with the open sea, therefore there were normal salinity conditions unsuitable for the deposition of salt.. While the analysis of the facts, clues, evidence, and records provided in this work demonstrates that during the Middle Jurassic period (**Bajocian-Bathonian, 166-170 Ma**), the Naza Arch of Mexico was in collision with the northwestern corner of South America (Gondwana), breaking the Jurassic Great Estelar Ridge, creating the Edinson Strait (Edinson Strait-North, JhonEdi Strait–Center, and Floris Strait-South) entering the Pacific Ocean to flood the Gulf of Mexico (Gulf of America and Gulf of Mexico), also flooding the paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia, **Demonstrated by the marine corridors of the lower and middle Jurassic, defined from the stratigraphic columns 1,2,3,3a,3b,3d and 3d; 4, 4a, 3c (later eroded), Figures 6,9,10,11,12,13,14,15,16.** This generated a restricted flow of seawater, causing low circulation and therefore hypersalinity, which, combined with the large extent of the Basin and the high atmospheric conditions of high temperatures, favored the rapid deposition of salt. (**Filina et al 2022**), which reached a thickness of 3 to 4 km. **We can clearly conclude that the salt from the Eastern Cordillera of Colombia is part of the same environment, time and conditions as those that formed in the Gulf of Mexico during the Middle Jurassic.** (For further details about the events and implications in the O&G&M exploration cycle, consult the author of this article.)

Giant No.12 (Giant No. 19 Knocked Down from this series):

Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021

Un problema por resolver...

Hasta la fecha, entre la Sabana de Bogotá y el Páramo de Sumapaz no hay un modelo tectónico actualizado que tenga en cuenta las principales características del estilo estructural y proporcione argumentos para definir el rol de la sal y la cronología del plegamiento.

Answer: This study lays the groundwork for understanding the Sumapaz and Bogotá Savannah areas, which are key to reconstructing the area's tectonic model. (For further details about the events and implications of the oil, gas, and mining exploration cycle, please consult the author of this article.)

All of the above, integrated, can be applied to the following problem basins, reported by Dr. **Filina et al 2022**.

Furthermore, there are many other sediment-filled extensional basins around the world that need to be better understood, such as the Caspian Sea, the Black Sea, the Aleutian Basin, the Baltic Sea, and the Sea of Japan. The approach of combining the perspectives of both in-

The existence of the above phenomenon is not only anecdotal, but has an impact that has not been widely related and studied **on the Petroleum, Mining, and Social Systems of the area.**

Implications of Jurassic Salt in Petroleum Systems.

We can conclude that we have identified two new unexplored plays and/or petroleum systems in the Cundinamarca Basin, belonging to the Jurassic paleobasin of the Eastern Cordillera of Colombia.

1. **Jurassic Play:** Formed by the deposition of organic shales from the Lower Jurassic - Hypothetical **Zipa Formation** of Edinson Alvarez 2025 (Source Rock) contemporaries with Morrocoyal and Montebel formations. Interdigitated towards the edges of the Basin with detrital volcanosedimentary, slope deposits, debris flows, turbidites (Reservoir Rock) and a 3 to 4 km seal of salt deposited during the Middle Jurassic.
2. **Cretaceous play associated with salt seal:** Source Rock: Fómeque Formation, Reservoir Rock: Une Formation, Seal Rock: Migrated Salt. The same applies to upper sequences.

Implications of Jurassic Salt for Mining Systems

Salt has been important since pre-Hispanic times for the development of indigenous cultures and later during the colonial period after the Spanish conquest. Few salt mines are currently operational, and most are not technologically advanced. Salt springs are abundant in the eastern mountain range basin.

But the most notable and worthy fact in this article is the role of salt and its participation in the mixing of hydrothermal fluids that gave rise to the eastern (Cretaceous age) and western (Oligocene age) emerald belts of the Eastern Cordillera of Colombia (age debate) (**Andres M. Ravelo 2020**). According to **Andres M. Ravelo (2020)**, some trace elements, such as the V/Cr ratio, and trace elements like Fe, Na, and Mg, help differentiate the beauty, color, and brilliance of Colombian emeralds. (Sodium is probably contributed by salt, among other minerals.) This distinguishes Colombian emeralds from others around the world. (**Figure 17**. Fura, one of the largest rough emeralds in the world - Muzo - Boyacá, Colombia. Tablazo Sub-basin, **Figure 14**).

Implications of Jurassic Salt in Social Systems.

The largest and most important salt dome in Colombia, located in the city of Zipaquirá, Cundinamarca, houses the **underground Salt Church**, one of the most important in the world. **In 2024, it received over 700,000 tourists.** (**Figure 18**. Note from the newspaper El Tiempo, 2025; **Figure 19**. Facilities of the Zipaquirá Salt Church). It is boosting the economy of the region and the country.

This methodology is also applicable to complex areas such as pre-salt belts, the Gulf of Mexico, Gulf of America, Brazilian coast, African coast, Mediterranean, the coasts of Alaska and Canada, the mountain ranges and foothills of the Rocky Mountains, Andes, Atlas Mountains, Himalayas, and the Arabian Peninsula, among others, as well as areas of low or minimal tectonic structural complexity. **It also helps increase production in complex reservoirs by confirming and refining the geological and geomechanical models of reservoirs that present this problem of double or even triple interpretations and models.**

Some of the tools of the SCT Complex Source Theory, such as the SCT EAST-P method, were proposed to Ecopetrol in April 2024, for a value comparable to the transactions of large technology companies. This value logically exceeded the company's economic and financial capacity; **therefore, we invite to @Pötus, Forbes List and giant Companies to participate in this development.**

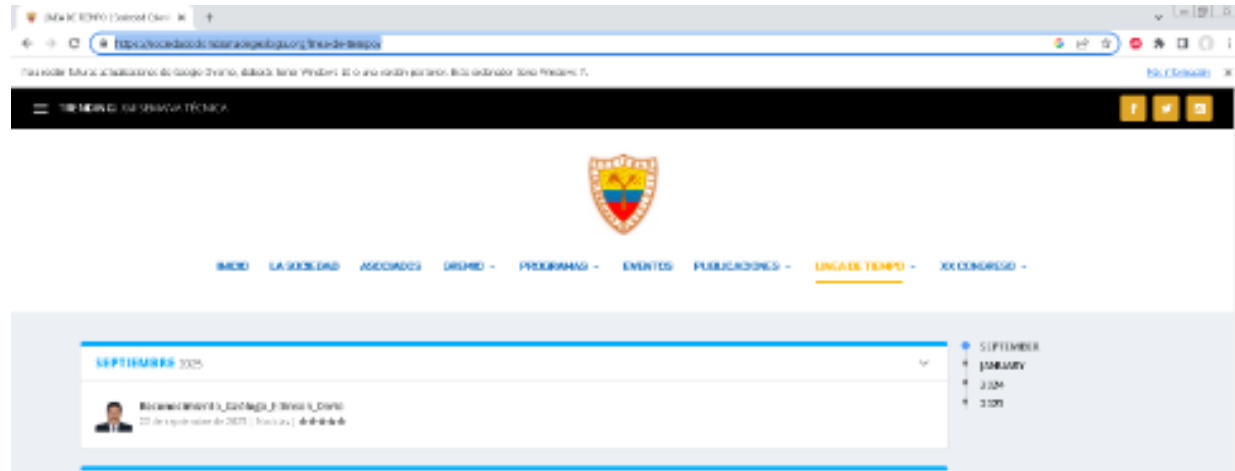
Analysis of the technical support has deserved him recognition for his contributions to geoscientific knowledge of Colombia by important personalities and entities..(Maya journal of geosciences September edition 2025, pag. 154, Art-1/10), <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/08/Revista-Maya-Geociencias-Septiembre-2025.pdf>.

Article-2(Páginas-37-47): <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/09/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXV-2025.pdf>.

Article-3(páginas-76-98):<https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/10/Revista-Maya-Geociencias-EDICION-ESPECIAL-XXVI-2025.pdf>

Article-4(páginas-169-180): <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/11/Revista-Maya-Geociencias-Diciembre-2025.pdf>

The prestigious **Colombian Geological Society (SCG)** has joined in disseminating the recognition and results of the research work through publication on its website. [https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento edinson_dario/](https://sociedadcolombianadegeologia.org/reconocimiento%20edinson%20dario/)



Note1: The Colombian Geological Society (SCG) and the Colombian Association of Petroleum Geologists and Geophysicists (ACGGP) are private organizations that fulfill a similar social function - public functions: To disseminate, publicize, and support everything related to knowledge of Geosciences and Earth Sciences.

We reject the institutional blockade and censorship applied to this research work by **Jaime Gonzalo Checa Jimenez, President of ACGGP, and Flover Rodriguez Portillo, Executive Director**, who have on three occasions denied the publication of both the recognition granted by prestigious entities for the research work in geosciences and the informative articles presenting the results of the work classified as being of national interest. **In addition to denying the recognition granted for contributions to the country's geosciences, they are arbitrarily attempting to impose a prior review of the informative articles, which is prohibited by law and international agreements and treaties, violating freedom of expression and freedom of information, fundamental and supreme values in a democracy. (Art 13 CADH)**

“Censorship is inherently discriminatory(...)” (Judgment T 539 of 1994). Based on the premise, the application of censorship discriminates against the affected person, by the same way Furthermore, through their actions, **Mr. Jaime Gonzalo Checa Jimenez, President of the ACGGP, and Mr. Flover Rodriguez Portillo, Executive Director**, would be discriminating against the President of the United States of America, who is one of the many individuals and audience members to whom this informational message is directed. In addition, they are concealing information of national interest from the Colombian people by obstructing the free flow of information and public debate regarding the results of this geoscience research. **(Art 13 Convención Americana Derechos Humanos).**

REFERENCES

- Alarcón Gómez, C. M., Gómez-Coronado, J. S., Lizarazo Pabón, J. A., Díaz Villamizar, J. S. & Patarroyo, G. D. 2019. Nuevo Reporte De Plantas Fósiles En La Formación Girón Sobre El Cañón Del Río Lebrija, Santander. Estratos-Uis-2019. 2p. Boletín No 375.
- Alberto Nuñez Tello. 1986. Petrogenesis Del Batolito De Ibagué. Ingeominas. Geología Colombiana No. 15.1986. Pp.35-45. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6560058>
- Alarcón CM, Clavijo-Torres J, Mantilla-Figueroa LC, Rodríguez JG. 2020. Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (cordillera Oriental, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 44(173):1137-1151, octubre-diciembre de 2020. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>
- Alejandro Piraquive Bermudez 2017. Structural Framework, deformation and exhumation of the Santa Marta Schists: accretion and deformational history of a Caribbean Terrane at the north of the Sierra Nevada de Santa Marta. Tesis Doctoral Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Bogotá, Colombia 2017. 394 p
- Andreina Garcia Reyes 2018, Thesis Doctoral-Sorbonne University. Magnetic anomalies and plate tectonic history of the caribbean plate and Mexican Gulf. 218p.
- Andréina García-Reyes, Jérôme Dymont. 2021. Structure, age, and origin of the Caribbean Plate unraveled. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 571, pp.117100. 10.1016/j.epsl.2021.117100 .hal-03452889 29 p.
- Andres Sebastian Martin Ravelo. 2020. Mineralogía, Aspectos geoquímicos y petrogénesis de las esmeraldas en el modelo colombiano. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=15gZ7AVww84>
- ANH-UIS 2008. Evolución Térmica De La Subcuenca De La Baja Guajira. Contrato N° 56 De 2008. UIS-ANH INFORME FINAL 144 p.
- ANH-Universidad Nacional de Colombia 2020. Evaluación del potencial Exploratorio de las Unidades Cenozoicas del Valle Superior del Magdalena. 800 p. <https://experience.arcgis.com/experience/b4cebb9e9f8743e5b0d75264121d93bc/>
- ANH-UPTC 2020, Integración Geológica, Evaluación De Los Sistemas Petrolíferos Y Prospectividad De Las Cuencas Frontera De Colombia. Cuenca Cordillera Oriental. Sogamoso, Diciembre de 2020. 441p
- ANH-UPTC 2024. Atlas De Areas De Interés Para La Exploración De H2 En El Norte De Colombia- 104 p.
- Aurora Zavala-Monsiváis1,*, José Rafael Barboza-Gudiño2, Fernando Velasco-Tapia3, María Elena García-Arreola2. 2012. Sucesión volcánica Jurásica en el área de Charcas, San Luis Potosí: Contribución al entendimiento del Arco Nazas en el noreste de México. 28 p. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 64, núm. 3, 2012, p. 277-293 <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v6>
-

- Bayona, G., Rapalini, A. and Costanzo-Alvarez, V. 2006. Paleomagnetism in Mesozoic rocks of the northern Andes and its implications in Mesozoic tectonics of northwestern South America. *Earth, Planets and Space*, 58, 1255–1272, <https://doi.org/10.1186/BF03352621>
- Bayona, G., Jiménez, G., Silva, C., Cardona, A., Montes, C., Roncancio, J. and Cordani, U. 2010. Paleomagnetic data and K–Ar ages from Mesozoic units of the Santa Marta massif: a preliminary interpretation for block rotation and translations. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 817–831, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.005>
- Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G. and Salazar–Franco, A.M. 2020. Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. *Publicaciones Geológicas Especiales*, 36, <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.05>
- Blanco-Quintero, I.F., García-Casco, A. et al. 2014. Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*, 56, 1852–1872, <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.963710>
- Blickwede, J.F. 2001. The Nazas Formation: A detailed look at the early Mesozoic convergent margin along the western rim of the Gulf of Mexico Basin. *AAPG Memoirs*, 75, 317–342.
- Boschman, L.M., van Hinsbergen, D.J., Torsvik, T.H., Spakman, W. and Pindell, J.L. 2014. Kinematic reconstruction of the Caribbean region since the Early Jurassic. *Earth-Science Reviews*, 138, 102–136, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.007>
- Carlos A. Vargas and Paul Mann 2013. Tearing and Breaking Off of Subducted Slabs as the Result of Collision of the Panama Arc-Indenter with Northwestern South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 3, pp. 2025–2046, June 2013, 22p. <https://doi.org/10.1785/0120120328>
- Carlos Alberto Vargas, Carlos A. Zuluaga, Mathias Bernet, and Sergio Amaya. 2025. Surficial serpentinite emplacements and their potential links with the mantle wedge in NW South America. 12 p. <https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/SP558-2023-120>
- Cediél, F., R. P. Shaw, and C. Ca´ceres, 2003, Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79*, p. 815– 848. 34 p.
- Clasificación de Rocas Magmáticas. <https://post.geoxnet.com/rocas-magmaticas-clasificacion-de-los-magmas/>
- Definición de Batolito. <https://petroigne.wordpress.com/formas-de-yacimiento/formas-plutonicas-y-filonianas/plutones/batolitos/>
- C.J. Busby1 and E. Centeno-García2.2022. The “Nazas Arc” is a continental rift province: Implications for Mesozoic tectonic reconstructions of the southwest Cordillera, U.S. and Mexico. 1Department of Earth and Planetary Sciences, University of California, Davis, California 95616, USA 2Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria, México D.F. 04510, México 23p 2022 the geological society geological of america.
- Coombs, H.E., Kerr, A.C., Pindell, J., Buchs, D., Weber, B., and Solari, L., 2020, Petrogenesis of the crystalline basement along the western Gulf of Mexico: Postcollisional magmatism during the formation of Pangea, in Martens, U., and Molina Garza, R.S., eds., *Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic–Cenozoic Basins: Geological Society of America Special Paper 546*, p. 1–24, [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(02\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(02)).
- Dany Yuleimar Mejía Vélez. 2019. Metamorfismo Jurásico En Los Andes Colombianos: ¿Respuesta Del Arco A La Transición De Un Régimen De Subducción Extensional A Uno Transpresivo? . Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales, Área Curricular de Recursos Minerales Medellín, Colombia 2019. 85 p. tesis maestria.
- Diego Osorio-Afanador, Francisco Velandia. 2021. Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in The Girón Formation, northern Andes of Colombia 30p. *Andean Geology* 48 (2):237-266. May, 2021 doi: 10.5027/andgeoV48n2-3264
- D. F. Jaramillo-Minorta, et al, "Modelo sedimentario-deposicional de la formación Girón en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca, Santander, Colombia" *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 23 (2), pp. 37-49, julio. 2023. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v23.n2.2023.16147> 13p.
- D. Tamara, E. Rojas, L. Quientero, F. Lascarro, D. Manco. Aspectos tectonicos en la genesis de la Formacion La Quinta y su relacion con los depositos minerales de cobre en la serrania del Perija, Colombia. *Tecnura*, 28(79), 123-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.2082417> p.
- Fabio Cediél, Robert Peter Shaw 2019. *Geology and Tectonics of Northwestern South America The Pacific-Caribbean-Andean Junction*. 1010 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9> .
- Gómez, J., Montes, N.E. & Marín, E., compiladores. 2023. Mapa Geológico de Colombia 2023. Escala 1:1 500 000. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc_1_5M2023.aspx
- Horton, B.K., Parra, M. & Mora, A. 2020. Construction of the Eastern Cordillera of Colombia: Insights from the sedimentary record. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 67–88. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.03>
- Ian Davison, James Pindell & Johnny Hull 2018. *The Basins, Orogens and Evolution of the southern Gulf of Mexico and northern Caribbean*. 52 p. Published by The Geological Society of London.
- Instituto Nacional de Investigaciones Geologico-Mineras 1970. *Economic Geology Of The Zipaquirá Quadrangle And. Adjoining Area*, 141 p.
- Ingeominas. 1985. compilación-y-diagnóstico-de-la-información-geoquímica-histórica-en-la-parte-central-de-la-cordillera-oriental-36-638.
- Irina Filina , James Austin, Tony Dor´e , Elizabeth Johnson , Daniel Minguez , Ian Norton , John Snedden , Robert J. Stern. 2022. Opening of the Gulf of Mexico: What we know, what questions remain, and how we might answer them. 30 p. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229150>
- Irina Filina and Erin Beutel. 2022. *Geological and Geophysical Constraints Guide New Tectonic Reconstruction of the Gulf of Mexico*. University of Nebraska – Lincoln College of Charleston. November 22, 2022. 36p.
- James Lawrence Pindell. 1981. Permo-Triassic reconstruction of Western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean región. University at Albany, State University of New York. 133p Master thesis.
- James L. Pindell 1985. Alleghenian Reconstruction And Subsequent Evolution Of The Gulf Of Mexico, Bahamas, And P Roto-Cari B Bean James L. Pindell. Exploration Research Division, Pennzoil Company, Houston, Texas. 39p 210ma Tectonics, Vol. 4, No. 1, Pages 1-39, January 1985.

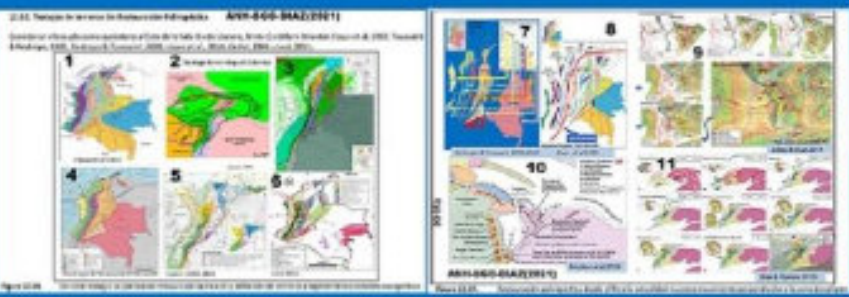
- James Pindell and Lorcan Kennan 2001. Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. Tectonic Analysis, Ltd., Dept. Earth Science, Rice University, Houston, Texas, USA. 51 p.
- J. Pindell L. Kennan K.P. Stanek W.V. Maresch And G. Draper 2009. Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. Tectonic Analysis Ltd. Department of Earth Science, Rice University 39 p.
- James Pindell & Lorcan Kennan 2009. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In: James, K., Lorente, M. A. & Pindell, J. (eds) The geology and evolution of the region between North and South America, Geological Society of London, Special Publication.
- James Pindell 2013. Origin of the Caribbean? Look Toward the Pacific. 7p. Explorer Newsletter.
- James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina-Garza, Rod Graham and Bodo Weber. 2020. A revised synthesis of the rift and drift history of the Gulf of Mexico and surrounding regions in the light of improved age dating of the Middle Jurassic salt. 2020. Geological Society, London, Special Publications, 504, <https://doi.org/10.1144/SP504-2020-43>
- James Pindell, Diego Villagómez, Roberto Molina Garza, Alejandro Beltrán, Daniel F. Stockli, Mark Wildman. 2022 Late Cretaceous–Miocene depositional evolution of Chiapas, Mexico: A foreland controlled by collision of Greater Antilles arc and the subsequent relative migration of the Chortís Block. 29 p.
- James Pindell 2021. Catedra Selecta – Tectonic evolution Mexican Gulf-Conferencia Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=8CAhxGbnL9w>
- James Pindell 2022. 52.2 James Pindell - Dynamo-thermal subsidence and sag–salt section deposition-Conferencia.
- Jose Rafael Barboza-Gudino, Maria Teresa Orozco-Esquivel, Martin Gomez-Anguiano, Aurora Zavala-Monsivais. 2008. The Early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern Mexico. 15p. 2008 Journal of South American Earth Sciences 25 (2008) 49–63.
- Juan Camilo Ruiz Amaya. 2021. Modelamiento estructural entre el Páramo de Sumapaz y la Sabana de Bogotá. Charla youtube ACGGP. 2021
- López-Isaza, J.A. & Zuluaga, C.A. 2020. Late Triassic to Jurassic magmatism in Colombia: Implications for the evolution of the northern margin of South America. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 77–116. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.03> 40 p.
- M. B. I. Weber, A. Cardona, F. Paniagua, U. Cordani, L. Sepulveda & R. Wilson. 2009 The Cabo de la Vela Mafic–Ultramafic Complex, Northeastern Colombian Caribbean region: a record of Multistage evolution of a late Cretaceous intra-oceanic arc. 20 p- From: JAMES, K. H., LORENTE, M. A. & PINDELL, J. L. (eds) The Origin and Evolution of the Caribbean Plate. Geological Society, London, Special Publications, 328, 547–566. DOI: 10.1144/SP328.22 0305-8719/09/\$15.00 # The Geological Society of London 2009.

- Maria Luisa Monsalve-Bustamante*, Harold Avila-Vallejo, Ivan Darío Ortiz-Martin and Susana Osorio-Ocampo. 2022. Characterization and space–time distribution of Plio-Quaternary volcanism NE of Caldas, Colombia. 23p. https://www.researchgate.net/publication/389622981_Characterization_and_space-time_distribution_of_Plio-Quaternary_volcanism_in_the_Northeast_of_Caldas_Colombia
- Martin Reyes^{1,2} · Jonas Kley¹ · Andrés Mora³ · István Dunkl⁴ · Juan Carvajal-Torres^{2,5} 2024. Age and tectonic setting of Mesozoic extension constrained by the first volcanic events in the Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. Received: 6 June 2021 / Accepted: 20 June 2024 © The Author(s) 2024 International Journal of Earth Sciences <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02441-7> 27 p.
- Mildred Del Carmen Zepeda Martinez - Tesis Doctoral UNAM. 2021. Reconstrucción de la Evolucion tectono sedimentaria del jurásico temprano-medio de la cuenca Tlaxiaco, Sur de México. Implicaciones en la Historia de Atenuación continental del margen occidental de Pangea. 213 p.
- Moreno-Sanchez, M., and A. Pardo-Trujillo, 2003, Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean plate, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 891– 924. 34 p.
- Oswaldo Ordoñez C. 2020. ORO EN COLOMBIA: HISTORIA, PRESENTE Y POTENCIAL. Charla Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=R0VCM1KU-0>
- Patarroyo, P. 2020. Barremian deposits of Colombia: A special emphasis on marine successions. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 403–439. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.12> 38 p.
- Pindell, James Lawrence (1985) Plate-tectonic evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean region, 302 p. Durham Doctoral theses, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/7042/>
- Pindell, J., Kennan, L., Maresch, W.V., Stanek, K.-P., Draper, G., and Higgs, R., 2005, Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins, in Avé Lallemant, H.G., and Sisson, V.B. eds., Caribbean–South American plate interactions, Venezuela: Geological Society of America Special Paper 394, p. 7–52, doi: 10.1130/2005.2394(01). 46 p.
- Rodríguez-García, G.; Zapata, J.P.; Correa-Martínez, A.M.; Ramírez, D.A.; Obando, G. (2020). Aportes al conocimiento del plutonismo del Arco Mocoa-Santa Marta durante el Jurásico Temprano-Medio, en la margen noroccidental de los Andes, Colombia. Boletín de Geología, 42(3), 15-50. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n3-2020001> 36 p.
- Rodríguez García, G., Correa Martínez, A. M., Zapata, J. P., Ramírez, D. A., & Sabrica, C. A. (2022). Evolution of arc magmatic cycles from the Carboniferous to the Early Cretaceous in the western paleomargin of Gondwana, north of the Andes. Boletín Geológico, 49(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.2.2022.663> 29 p.

- Rodríguez-García, G., Correa-Martínez, A.M., Zapata-García, G., Arango-Mejía, M.I., Obando-Erazo, G., Zapata-Villada, J.P. & Bermúdez, J.G. 2020. Diverse Jurassic magmatic arcs of the Colombian Andes: Constraints from petrography, geochronology, and geochemistry. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, 54 p. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.04> 54p.
- Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03> 28p.
- Sanchez, Javier and Paul Mann, 2015, Integrated structural and basinal analysis of the Cesar-Rancheria Basin, Colombia: Implications for it's tectonic history and petroleum systems, in C. Bartolini and P. Mann, eds., Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin: AAPG Memoir 108, p. 431–470.
- SGM 2014. Formación Nazas. 4p. Ficha de Unidad litoestratigrafica-Formación.
- Spikings, R. & Paul, A. 2019. The Permian – Triassic history of magmatic rocks of the northern Andes (Colombia and Ecuador): Supercontinent assembly and disassembly. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 1–43. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.01> 44 p.
- Spikings, R.; Van der Lelij, R. The Geochemical and Isotopic Record of Wilson Cycles in Northwestern South America: From the Iapetus to the Caribbean. Geosciences 2022, 12, 5. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010005> 32 p.
- Timoleón Garzón 2021. Potencial mineral y algunos proyectos mineros colombianos. Charla Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=0-5meQFa3As>
- Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 2020. Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. Second part: Oceanic terranes. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 2 Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 36, p. 237–260. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.07> 24p.
- Vargas, C.A. 2020. Subduction geometries in northwestern South America. In: Gómez, J. & Pinilla-Pachon, A.O. (editors), The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 397–422. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.11>
- Victor Ramos 2021. Nuevos paradigmas de la Tectónica Andina. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=9IfGdXKLqQY>
- Victor Ramos 2022. La tectónica mesozoica en los Andes Colombianos. Charla Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=VimLTqmB7y4>
- Villagómez, D., Steffensen, C., Pindell, J., Molina-Garza, R.S., Gray, G., Graham, R., O'Sullivan, P., Stockli, D., Spikings, R. 2006. Tectono-sedimentary evolution of Southern Mexico. Implications for Cretaceous and younger source-to-sink systems in the Mexican foreland basins and the Gulf of Mexico. 64 p.

God's grace allows us to solve mystery that has lasted more than 60 - 90 years.

11 proposed models, fail to answer all the questions that still exist.



Complex Source Theory will generate a revolution, a radical transformation of the mining and energy industry, giving different solutions for increase O&G&M discoveries, reserves and production, in complex and normal areas.

Contact: edinson.alvarez@gmail.com
O&G and Mining Geoscientist Exploration Specialist

i invite @realDonaldTrump to mediate with the big companies and VIP.

- * New concepts
- * New methodologies
- * Interdisciplinary teams
- * New science
- * New Technologies
- * New Results



edinson.alvarez@gmail.com

Exploration Geologist Specialist - Geophysicist, expert in O-&G-Mining integrated studies (Colombia, Perú and México), Giving solutions to geoscientific problems, which have been in uncertainty for more than 5 decades. With important + economic implications.

The God's grace guide us to develop the "Complex Source Theory", a new mechanism that allow us increasing traditional O&G&M discoveries, production, reserves, as new energies and CCUS.

Geological mapping, surveys design, acquisition, processor PSTM (Conv-3C-4C-TZ-OBC), geomodeller, seismic interpreter and reservoir characterization (Conventional-and-Unconventional Reservoirs). Stratigraphic sequence, seismic attributes, AVO analysis, fluids substitution, seismic inversion, risk and uncertainty, leads and prospects, reserves.

Discovery of New prospective corridors and O&G prospects, in Foothills, Llanos, Putumayo, VIM, VMM, VSM, COR, CR, CAT, GuajiraOff-Guajira, SSJFB, Sinú-Sinu Off, Cayos basin, Colombia basin.

Introducción a la Geología del Plioceno-Cuaternario de Cuba

Manuel A. Iturralde-Vinent

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

ESTRATIGRAFÍA

Formaciones marinas

Depósitos terrestres

PALEOGEOGRAFÍA

TERRAZAS MARINAS

REFERENCIAS

INTRODUCCIÓN

En Cuba se han llevado a cabo numerosas investigaciones de la geología del Plioceno-Cuaternario, tanto desde el punto de vista estratigráfico como geomorfológico, tectónico y edafológico (Bresznyánszky *et al.* 1983; Ducloz 1963; Kartashov *et al.* 1976; 1981; Mayo 1970; Núñez Jiménez 1967; Pushcharovskiy *et al.* 1988; Peñalver *et al.* 1997 1998; Shantzer *et al.* 1977; Cabrera y Peñalver 2001, Iturralde-Vinent y Cabrera Castellanos, 1998; Kartashov *et al.* 1981). Otras publicaciones son los trabajos de Acevedo 1981, 1983; Ionin *et al.* 1977; Biosca *et al.* 1978; Ortega 1983; Iturralde-Vinent 1969a, 1969b, 1978, 1982, 2003; Nuevo Atlas Nacional de Cuba 1989; que han contribuido al mejor conocimiento del paleoclima y la evolución del relieve del territorio. También se han llevado a cabo investigaciones paleontológicas de las biotas terrestres, que constituyen referencias útiles durante el estudio del Cuaternario (Acevedo y Arredondo 1982; Iturralde-Vinent y MacPhee 1999; White y MacPhee 2001). Este artículo constituye una versión actualizada del capítulo ‘Geología del Plioceno-Pleistoceno’ de Iturralde-Vinent (2021).

ESTRATIGRAFÍA

Las investigaciones sobre la estratigrafía del Plioceno-Cuaternario en Cuba tienen una larga tradición desde finales del siglo XIX, y son muchos los trabajos recientes que además de compilar los conocimientos previos aportan nuevos datos (Albear e Iturralde-Vinent 1985; Bresznyánszky *et al.* 1983; Franco 1983a, 1983b; Ionin *et al.* 1976; Iturralde-Vinent 1969b; Iturralde-Vinent y Cabrera Castellanos 1998; Iturralde-Vinent y Hine 2023, Kartashov *et al.* 1976, 1981; Pushcharovskiy *et al.* 1988; Peñalver 1982; Peñalver *et al.* 1982a, 1982b, 1997, 1998; Shantzer *et al.* 1977; Cabrera y Peñalver 2001; Authemayou *et al.* 2023; 2025;). A pesar de esto, no se puede afirmar que el conocimiento de la estratigrafía del Plioceno-Cuaternario sea satisfactorio. Las

investigaciones mencionadas han permitido definir y cartografiar un gran número de formaciones litoestratigráficas y depósitos formalizados y no formalizados, cuyo orden de superposición está bastante bien establecido. Sin embargo, el problema principal es que no se conoce, sino a manera de estimados: a) la verdadera edad de las formaciones en el sentido geocronológico, b) el lapso de tiempo que abarca cada depósito o unidad litoestratigráfica, c) la duración de los hiatos erosivo-denudativos. Sólo las formaciones marinas del Plioceno o Plioceno-Pleistoceno Inferior se han podido distinguir sobre la base de datos paleontológicos relativamente confiables (Bermúdez 1950; Iturralde-Vinent 1969a, 1969b; Iturralde-Vinent y Morales 1973; Peñalver *et al.* 1982a, 1982b).

Sin embargo, el problema es más complejo, pues la mayoría de los autores no definen o son imprecisos al referirse al Plioceno, Pleistoceno y Holoceno. Por ejemplo, Ducloz (1963) utilizó como escala de referencia los glaciales e interglaciales, un método que se considera completamente correcto. Kartashov *et al.* (1981) subdividieron el Pleistoceno de una manera muy peculiar, en dos niveles: uno inferior “húmedo” y otro superior “seco”, con el límite a los 700 000 años. Esto ha sido fuertemente criticado (Acevedo 1983; Ortega 1983; Ortega y Zhuravliova 1983), pues contradice todo lo conocido sobre la climatología y estratigrafía del Cuaternario. En la literatura cubana disponible, la posición de los límites Plioceno-Pleistoceno, Pleistoceno-Holoceno y las subdivisiones del Pleistoceno se han seleccionado de manera convencional, coincidente con algún cambio en la litología del corte, la posición estratigráfica o altitud de los depósitos o superficies de erosión, dando lugar a una multitud de interpretaciones muy discutibles (Ducloz 1963; Bresznyánszky *et al.* 1983; Franco 1983a, 1983b; Peñalver *et al.* 1982a; 1982b; 1997; 1998). Cuando se leen con detalle las discusiones sobre la designación de una sección estratigráfica a una u otra formación, o respecto a su edad (vea Kartashov *et al.* 1976, 1981; Peñalver *et al.* 1982a, 1982b, 1997; Cabrera y Peñalver 2001), se evidencia que hay muchos criterios subjetivos involucrados en la toma de posiciones, y que a menudo han prevalecido consideraciones de tipo litológicas, cuando la litología es consecuencia del ambiente sedimentario y no de la antigüedad del depósito.

En el caso de las rocas y depósitos de origen no marino, la cuestión es aún más compleja, pues su edad a menudo se ha establecido sobre la base de criterios subjetivos, como el grado y tipo de intemperismo (Kartashov *et al.* 1976, 1981), o de acuerdo a la posición relativa del depósito terrestre con respecto a una formación marina, también mal fechada (Peñalver 1982; Cabrera y Peñalver 2001).

Fechados de edad absoluta se han reportado de la Formación Jaimanitas (131 ka según Peñalver *et al.* 1997) y de las turbas de la península de Zapata que sobreyacen las calizas de la Formación Península de Zapata, con 18 ka (Ducloz 1963). El problema principal radica en la escasez de fechados de edad absoluta y la falta de una geocronología moderna de las calizas de las terrazas marinas.

A esto se añade que los nombres de los eventos glaciales utilizados históricamente en Cuba (por ejemplo, glacial Illinois, interglacial Sangamon, glacial Wisconsin e interglacial Flandriano) han sido reemplazados actualmente por los “*Estadios Isotópicos Marinos*” (MIS), basados en el contenido

de isótopos de oxígeno en las testas de los foraminíferos, cuyas oscilaciones se han calibrar para expresar las oscilaciones del nivel del mar. Aquí se adopta este nuevo sistema (Lisieki y Raymo 2005; Spratt y Lisieki 2016; Muhs et al. 2019), siempre que es posible.

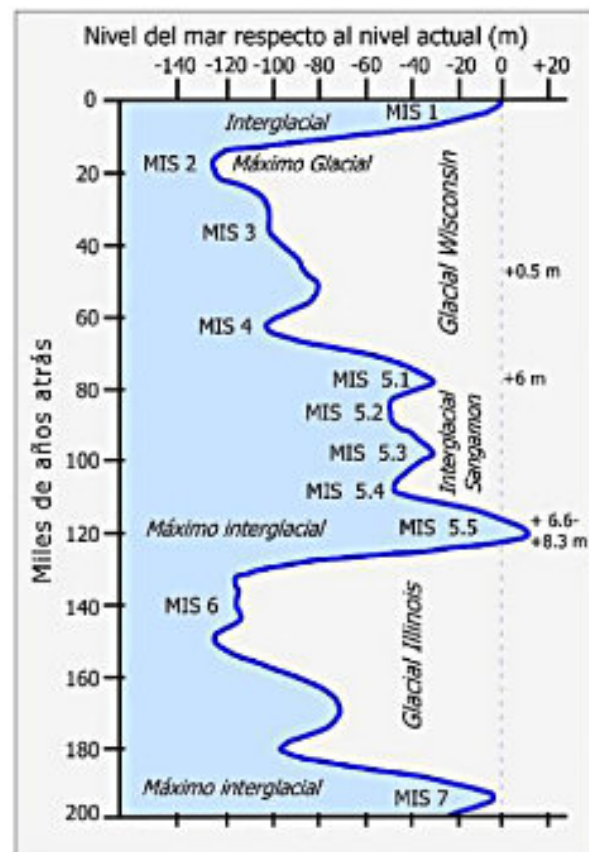


Fig. 1. *Estadios Isotópicos Marinos* (MIS). Adaptado de Lisieki y Raymo 2005; Spratt y Lisieki 2016; Muhs et al. 2019.

Otro aspecto que necesita revisión es la nomenclatura estratigráfica, pues algunos autores han descrito "nuevas unidades", que están en sinonimia con otras bien descritas con anterioridad. Ejemplo es el depósito tipo Manguito caracterizado como una saprolita de caliza (corteza de intemperismo) por Iturralde-Vinent (1967), que Kartashov *et al.* (1976, 1981) la incluyeron posteriormente dentro del contenido de su "Formación Villarroja", asumiendo que Iturralde-Vinent (1967) se había equivocado al interpretar el origen de Manguito. El código de nomenclatura estratigráfica establece que las unidades se definen por su composición litológica y edad, no por su génesis, que siempre está sujeta a interpretación. Otro error de Kartashov *et al.* (1976, 1981) ha sido sustituir el nombre Ensenada Grande (Acevedo y Gutiérrez, 1974) bien establecido con prioridad, para sustituirlo por el de "Formación Guane", porque Kartashov *et al.* (1976, 1981) consideraron que algunos cortes de Ensenada Grande son cortezas de intemperismo. Aquí el problema metodológico principal radica en que para debatir el estatus de una unidad litoestratigráfica, hay que basarse en la localidad tipo. Al respecto, Acevedo (1983), Ortega (1983), Ortega y Zhuravliova (1983) y Dzulynsky *et al.* (1984) demostraron que algunas supuestas "formaciones marinas" descritas por Kartashov *et al.* (1981), como Villarroja y Guane, de hecho, constituyen depósitos terrestres. Por lo tanto, en este trabajo se retoman los nombres originales de Manguito y Ensenada Grande, que tiene prioridad sobre Villarroja y Guane.

El hecho concreto es que las "formaciones" no pueden colocarse en sinonimia, o abandonar su uso, simplemente porque haya un desacuerdo sobre la génesis del depósito. Otro problema es que Kartashov *et al.* (1976, 1981) han asignado categoría de formación litoestratigráfica a las capas de sedimentos friables del Cuaternario, práctica que puede conducir al extremo de darle nombre a cada lecho de aluvio, coluvio, suelo y playa.

En este capítulo se designan como formaciones litoestratigráficas solamente las unidades marinas bien diferenciadas y cartografiables, y se describen como "depósitos" las capas sedimentarias no consolidadas de origen terrestre, siguiendo la propuesta de Dzulynsky *et al.* (1984). Al respecto se recomienda consultar las reflexiones de Acevedo (1983), Dzulynsky *et al.* (1984) y Ortega y Zhuravliova (1983), donde se demuestra el carácter terrestre de algunos depósitos que Cabrera y Peñalver (2001) siguen considerando de origen marino, sin aportar nuevas evidencias. A continuación, se ofrece la descripción de algunas unidades litoestratigráficas del Plioceno-Holoceno.

FORMACIONES MARINAS

En este acápite se describen brevemente, En orden cronológico del Plioceno al Cuaternario, las formaciones marino-costeras que forman el substrato de las llanuras costeras, la plataforma insular, los cayos e islotes, y en las terrazas marinas que se encuentran distribuidas en las costas rocosas de Cuba.

PLIOCENO

Correspondientes al Plioceno se han descrito varias formaciones marino-costeras como La Cruz, Maya y Morro.

"Formaciones" Cayo Piedras y Punta del Este (Franco y De La Torre 1980).

Localizadas en la costa sur de Isla de la Juventud, se propusieron para caracterizar la sección del Neógeno que constituye la mayor parte de la mitad meridional de la Isla. La descripción original es algo general y su edad se estima Mioceno o Plioceno. La localidad tipo se define en las cuevas de Punta del Este (Isla de la Juventud), donde descansa debajo de la Formación Cocodrilo (Franco y De la Torre 1980).

En la cueva no. 1 de Punta del Este afloran calizas biotriticas, a veces pseudoolíticas, de grano fino, bien cementadas, con moldes de moluscos, de color blanco gris amarillento, masivas, con un espesor mayor de 10 metros. Contienen *Chione* sp., y Veneridae. En Cayo Piedra son lumaquelas en matriz margosa con *Chione cancellata* y *Bulla cf. occidentalis*, que suprayacen calizas arenar-cillosas, compactas. En general se describen como calizas arenosas, biotriticas y biocalcareniticas, gravas con fragmentos de calizas y conchas de moluscos, en menor grado calizas arcillo-arenosas, de color blanco amarillento y parduzco. Contienen: *Chione cancellata*, *C. pabha*, *Arca sebra*, *Codakia orbicularis*, *Lucina pensylvanica*, *Laevicardium laevigatum*. Se asemejan a depósitos marinos de ambiente retroarrecifal.

Formación La Cruz (Vaughan 1919).

Se extiende como una faja costera discontinua en Cuba sudoriental y, constituye el relleno principal de la depresión neotectónica de Santiago de Cuba, donde aflora profusamente.

Descripción. Calizas arcillosas, de aspecto irregular, con estratos mal definidos, color gris a crema amarillento (Figura 2), con numerosas bioglifos, en cuya base se desarrollan conglomerados y areniscas basales con clastos procedentes de las rocas vulcanógenas subyacentes, con las cuales descansa discordante. Su espesor alcanza no menos de 130 metros. Se cubre por la Formación Jaimanitas.

Tanatocenosis y edad. Contiene moluscos (*Pecten soror codercola*, *Chlamys cruciana*), foraminíferos (*Gypsina pilaris*), y ostrácodos del Plioceno (van den Bold 1975).



Fig. 2. Afloramiento de la Formación La Cruz, Carretera al Morro, Santiago de Cuba.

Formación Maya (Franco, 1983)

Se extiende como una faja discontinua en las terrazas altas de la costa de Cuba sudoriental.

Descripción. Según Cabrera y Peñalver (2001) son calizas biohémicas algales, coralinas y micríticas, con frecuencia aporcelanadas, con corales en posición de crecimiento, o fragmentarios; en menor grado moldes y valvas de moluscos. Las calizas se encuentran dolomitizadas. El contenido de arcilla es muy variable. Contiene abundantes clastos, desde granos de arena hasta cantos, provenientes de las rocas de las zonas vecinas emergidas. En ocasiones presenta intercalados horizontes de conglomerados polimícticos de granulometría variable y cemento calcáreo. Sus colores son blanco, amarillento, rosado o grisáceo. Esta formación constituye depósitos propios de un complejo arrecifal. Sobreyace rocas pre cuaternarias y de la Formación La Cruz, e infrayace a la Formación Jaimanitas. Su espesor oscila entre 30 y 80 m.

Tanatocenosis y edad. Predomina el coral *Acropora prolifera*. Contiene además *Diploriasa rassotana* y *Montastrea* cf. *M. limbata*; moluscos (*Nodipecten* ex gr. *N. nunezi*, *Spondylus americanus*). Según Franco (1983) su edad es Plio-Pleistoceno Inferior.

Formación Morro (Brönnimann y Rigassi 1963)

Esta desarrollada a lo largo de la costa norte desde la margen noroccidental de la bahía de Mariel hasta la margen nororiental de la bahía de La Habana.

Localidad tipo. Según Brönnimann y Rigassi (1963) se ubica en el extremo occidental de la excavación costera situada entre el Morro y La Cabaña, en la parte noroeste del canal de entrada a la bahía, coordenadas x361,310; y369,350 de la Hoja Habana.

Descripción. En la localidad tipo está representada por 10 m de calizas biógeno-algales de grano medio, con cierta laminación imperfecta localmente. Más arriba siguen unos 40 de caliza más densa, estratificada en capas de 15 cm. En esta parte se intercalan, sin orden preciso, lentejones de caliza laminar algal de grano fino, rosada y blanca, con dimensiones de 0,5 a 1 m de largo, y de 20 a 30 cm de espesor. Las calizas con algas fósiles son de color gris, con motas blancas en su superficie alterada. El color gris lo provoca la matriz carbonatada de grano fino a medio, en tanto que las motas blancas corresponden con las algas. Son raros los macrofósiles (Fig. 3). En esta localidad, junto a la costa, estas rocas se cubren de forma discordante por calizas porosas biógeno-detriticas, de la Formación Vedado.

En el corte a la salida del Túnel de La Habana, aflora la porción superior de la formación, que se compone de las calizas con estratificación poco evidente y con los lentejones de calizas laminas rosadas algales, a veces fragmentadas. Se observan moldes de pectínidos y gastrópodos. Sobre esta sección de unos 20 m de espesor yacen calizas porosas de la Formación Vedado.

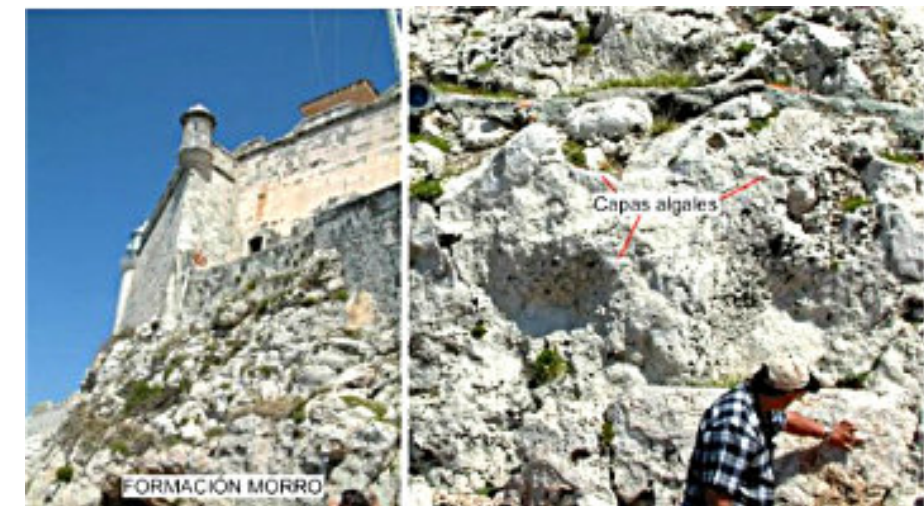


Fig. 3. Afloramiento de la Formación Morro bajo el Castillo del Morro, justo al norte de la localidad tipo.

En la segunda terraza de la margen occidental de la bahía del Mariel afloran calizas biógenas a biorelíticas, en parte dolomitizadas, con algas y moldes de foraminíferos, básicamente masivas. Hay horizontes ricos en pelecípodos que incluyen *Lyropecten* sp. del Mioceno tardío al Plioceno. Estas rocas pueden corresponder a la Formación Morro.

Tanatocenosis y edad. Brönnimann y Rigassi (1963) reportaron el molusco *Lyropecten* (*Nodipecten*) aff. *L. colinensis*, así como las algas *Jania*, *Melobesia* y *Mesophyllum*. Sobre la base de

estos fósiles se puede asumir una edad probablemente Plioceno, o tan joven como Pleistoceno Inferior.

Ambiente sedimentario. El ambiente sedimentario de la Formación Morro es muy peculiar, dada la monotonía de su contenido fosilífero. La presencia casi exclusiva de algas coralinas, muchas fragmentadas, indican un ambiente de aguas poco profundas, bien oxigenadas, muy movidas. Los lentes de caliza laminar parecen estar relacionados con el desarrollo de pocetas locales, donde ocurría la precipitación química de los carbonatos. Tales pocetas estaban probablemente protegidas de la acción del oleaje por cúmulos de arena los que, al romperse, fracturaban los depósitos y los incorporaban como fragmentos al material calcáreo algal.

PLEISTOCENO

En las regiones costeras y plataforma insular de Cuba se han descrito varias formaciones marino-costeras, correspondientes a los ambientes de barrera coralina, laguna marina, barras, playas y dunas. Es interesante destacar que, en la costa sur, desde Ciego de Ávila hasta Punta de Maisí, no se registran depósitos eólicos, que son muy comunes en toda la costa norte donde, desde Artemisa hasta Camagüey, se encuentran depósitos que se corresponden con antiguas plataformas carbonatadas y sistemas de playa-duna, pero son más comunes las paleodunas y paleoplayas, representadas por las formaciones Alegrías, Romano, Guillermo y Los Pinos (Figura 4), que se caracterizan a continuación:



Fig. 4. Estratigrafía de los cayos del norte de Cuba central. Según Iturralde-Vinent y Cabrera (1998).

A continuación, se caracterizan brevemente las unidades descritas.

Formación Casa Blanca (Brönnimann y Rigassi 1963)

Localidad tipo. En el punto de coordenadas x362,100; y368,650 de la Hoja Habana. Esta formación tiene desarrollo muy local al noroeste de la Bahía de La Habana, en el pueblecito de Casa Blanca.

Descripción. En su localidad tipo son calizas detríticas, porosas, nodulares, con abundantes microfósiles, sobre todo pectínidos y equinodermos. En la localidad tipo de la Formación Morro, sobre ella yacen, en franca discordancia, rocas muy semejantes a estas. Son calizas macroporosas, biógeno-detríticas a fragmentarias, con moluscos, equinodermos y corales. Contiene gran cantidad de material arcilloso-gravoso rojos carbonatizados, relleno de los poros, cavidades de disolución y grietas. Su color es crema-amarillento, alterado a gris.

Tanatocenosis y edad. Brönnimann y Rigassi (1963 p. 205) reportan los siguientes moluscos de la localidad tipo: *Modulus modulas*, *Strombus* spp., *Natica (Naticarins) camena*, *Polinices lacteas*, *Vasum muricatin*, *Bulla occidentalis*, *Pecten laurenti*, *Aequipecten gibbus*, *A. gibbus nucleus*, *Ostrea equestria*, *Chama macerophylla*, *Tracchycardium muricatum*, *Trigonoicardia (Americardia) medium* y *Lizophora paphis*. Los microfósiles identificados en varias muestras de la formación incluyen: *Amphistegina gibbosa*, *Sorites* sp., *Amphyroa* sp., Algas Dacycladaceas. Sobre esta base es difícil precisar la edad, que pudiera corresponder al Pleistoceno Inferior.

Sedimentogénesis Estas rocas se originaron en un ambiente marino costero, contiguo a una escarpa acantilada, lo que provocó la formación de las brechas y conglobrechas.

Formación Vedado (Brönnimann y Rigassi 1963).

Representa las calizas marinas pleistocénicas que yacen por debajo de la Formación Jaimanitas y por encima de la Formación Morro. Se han cartografiado por la costa norte de las provincias de Artemisa y La Habana, entre Santa Fe y Boca de Jaruco, pero Cabrera y Peñalver (2001) la reportan de otras zonas costeras en el resto de Cuba.



Fig. 5. Calizas biógeno-detríticas con capas de algas, en la localidad tipo de la Formación Vedado en el malecón de La Habana y Calle 23.

Localidad tipo. En la base del Hotel Nacional (Vedado, ciudad de la Habana), en la ladera norte, frente al Malecón. Coordenadas x356,72; y368,80 de la Hoja Habana (Figura 5).

Descripción. En la localidad tipo son calizas fragmentarias blancas con detritos de corales y moluscos. Son masivas, y en el corte de la Calle O a la entrada del Hotel Nacional, está constituida por conglomerados de calizas formados por grandes fragmentos de corales y calizas biógenas, representando el ambiente del pie del talud de rompiente de una costa abrasiva.

En varias localidades dentro de la ciudad de La Habana se encuentran afloramientos de las calizas biógenas y de los conglomerados y brechas de caliza, tal como en las calles 11 y 20, Vedado y en 5ta avenida y 70, Miramar. Otra buena sección aflora en el corte a la salida del Túnel de La Habana, sobre la Formación Morro. Este contacto es abrupto, pero concordante, lo que no excluye un hiato entre ambas.

Algunas capas biógeno-detríticas con moluscos, corales y con lentes algales alcanzan de 1 a 1,5 m de largo y hasta 30 y 40 cm de espesor (Figura 5), contienen fragmentos de calizas laminares de

grano fino, rosadas y blancas. En la parte alta de la sección se intercalan capas de calizas biógeno-relícticas masivas, muy compactas. El espesor total de la sección supera los 100 m y se cubre en discordancia por la Formación Jaimanitas. Todas las variedades de roca son porosas pues las conchas de aragonito de los moluscos y los exoesqueletos de otros invertebrados han desaparecido.

En Boca de Jaruco, a lo largo de la carretera Habana-Matanzas (Figura 6), están expuestas brechas de calizas constituidas por fragmentos angulares desde milímetros hasta 5 ó 10 cm, en una matriz calcárea. La roca es masiva y lateralmente pasa a calizas biógenas arrecifales, también masivas. La potencia de estos cortes no se ha medido, pero probablemente es inferior a los 50 m.



Fig. 6. Afloramiento de las calizas fragmentarias de la Formación Vedado en los farallones de la Jijira, Boca de Jaruco.

La Formación Vedado corresponde con la primera transgresión pleistocénica en la costa norte. Se cubre discordante por las formaciones Jaimanitas, Guanabo y Santa Fe, y yace sobre las formaciones Morro y Güines. Probablemente sea una facies lateral de la Formaciones Casa Blanca y Matanzas, pero está por determinar.

Tanatocenosis y edad. Cabrera y Peñalver (2001) reportan ostrácodos (*Bairdia dimorpha*, *B. pillosa*, *Bairdiopilata triangularis*, *Cytherella dominicana*, *Perissocytheridea* aff. *P. bicelliformis*, *Quadracythere* ex. gr. *Q. bichensis*, *Radimella confragosa*); moluscos (*Calyptrea equestris*, *Chione woodwardi*, *C. elattocostatum*, *Cypraea* cf. *C. patrespatriae*, *Marginula depressa*, *Lucina* cf. *L. podagrina*, *Ostrea frons*); corales (*Acropora prolifera*, *Montastrea limbata*, *Pachyseris rugosa*), equinodermos (*Brissus sagrae*, *Clypeaster cubensis*, *C. dalli*, *Schizaster cubensis*); y crustáceos

(*Mitrax hispida*). De la Torre (1967) considera su edad Pleistoceno Inferior. Puede haberse acumulado coincidente con MIS 7 (Figura 1).

Ambiente sedimentario. Las facies comprendidas dentro de esta formación se pueden clasificar, en conjunto, como de aguas someras, marino costeras, en parte depositadas al pie de acantilados costeros.

Formación Alegrías (Iturralde-Vinent 1981).

Se encuentra expuesta sólo en las elevaciones altas del Archipiélago Sabana-Camagüey, es decir, en la Sierrita de Santa Lucía, en los cayos Sabinal, en las lomas de Hornos y Jato de cayo Guajaba, en los altos de Juan Sáez, el Ají y silla de Romano en cayo Romano, que alcanzan los 27 m de altura.

Localidad tipo. Tiene su área tipo en las lomas Alegrías del Río en Cayo Sabinal y su sección tipo se designó en la cantera El Jato, en el extremo NW de la loma Alegrías del Río, con las coordenadas x878.00 y203.00 de la hoja Nuevitas. Esta elevación ha sido en parte demolida por extracción de materiales para la construcción.

Descripción. En la sección tipo Iturralde-Vinent (1981) describe, de abajo hacia arriba: calcarenitas a biocalcarenitas de grano fino, bien cementadas, masivas, sin macrofósiles, con detritos bien redondeados de algas calcáreas, foraminíferos (*Amphistegina* sp., Soritidae) y 2-15 % de granos de cuarzo, plagioclasa y rocas volcánicas; una capa de paleosol areno-arcilloso rojo ladrillo, que se cubre por calcarenitas de grano medio, semiconsolidadas, masivas, muy alteradas.

Cabrera e Iturralde-Vinent (1981) añaden que se compone de calizas pseudoolíticas esparitizadas, grainstone arenosas con *Amphistegina*, Soritidae, algas y grainstone-packstone de grano fino. Las rocas pseudoolíticas están formadas hasta 80 % por pseudo-oolitas, oolitas, pellets de 0,2 a 0,7 mm de diámetro y microorganismos. La fracción arenosa varía entre 2 y 5 % y la integran granos de cuarzo, plagioclasa y rocas volcánicas, que tienen forma subangular y un tamaño de 0,2 a 0,7 mm, así como minerales metálicos (¿titanomagnetita?) en cantidad menor de 5 %. El cemento es de contacto o de poro. La roca presenta fosfatización. El mayor espesor visible, de 25 m, se localiza en la cantera de Altura del Ají (Cayo Romano). Estas rocas presentan meteorización, formando un casquete recristalizado de 3 a 4 m de espesor, sobre el cual yace un suelo color rojizo de 30 o 40 cm de profundidad. La orientación general NW-SE de las colinas formadas por estas rocas (perpendicular a barlovento), la escasez de macrofósiles, el carácter rodado del material clástico y la presencia de variaciones granulométricas sugieren que el medio eólico fue importante para su génesis, probablemente una costa acumulativa arenosa con un ambiente de bajos y dunas costeras. En perforaciones practicadas en la playa Los Pinos (Cayo Sabinal), debajo de las calizas de la Formación Jaimanitas se cortaron rocas que probablemente constituyen un equivalente lateral de la Formación Alegrías, pero de un ambiente más marino. Se trata de grainstone finas, bioturbadas, recristalizadas, grainstone-packstone con pelecípodos o con foraminíferos Soritidae; packstone-boundstone con fragmentos de corales, grainstone oolito-pelletales con pelecípodos o gasterópodos y localmente colonias de *Solenastrea* bien conservadas. Estas rocas alcanzan un espesor de 20 m, son de color crema y, a veces, amarillentas y rosáceas, debido al intemperismo.

Edad. De acuerdo a su posición estratigráfica, la edad de la Formación Alegrías puede considerarse tentativamente como Pleistoceno Inferior a Medio; probablemente isócrona con la Formación Vedado (Brönnimann y Rigassi 1963) y la Formación Guanabo (Franco 1975).

Formación Matanzas (Torre 1963)

Ocupa dos pequeñas zonas en la ciudad de Matanzas. Su sección tipo es el corte expuesto en Versalles, Matanzas.

Descripción. Está formada por calizas biodetríticas y margas arenosas, masivas a mal estratificadas, porosas, con cementación débil, y lentes irregulares de calcarenitas y biocalciruditas. El color varía de crema a crema-parduzco. Su espesor es de unos 20 m. Yace discordante sobre la Formación Canimar y la cubre la Formación Jaimanitas. Se depositó en una plataforma coralina.

Tanatocenosis y edad. Contiene moldes y conchas de moluscos y corales de especies aún vivas (De la Torre y Kojumdieva 1985). De acuerdo a su posición estratigráfica y la modernidad de los fósiles, pudiera corresponder al Pleistoceno Medio tardío.

Formación Guanabo (Franco 1975)

Fue descrita por Franco (1975) para caracterizar las "calcarenitas eólicas" que Brönnimann y Rigassi (1963) así como Ducloz denominaron *lower calcarenite* y las incluyeron en la Formación Jaimanitas. La decisión de distinguir esta sección es correcta, pues ella ocupa una posición más alta en el relieve, yace sobre rocas del Mioceno y más antiguas. Estas calcarenitas coronan unas colinas situadas a 1,5 y 2 km de la costa, que alcanzan de 20 a 50 m de altura como máximo.

Localidad tipo. Tiene su localidad tipo en los afloramientos que aparecen a 1,7 km al oeste del río Guanabo, en una colina que corta la Vía Blanca en Marbella, coordenadas x370,300; y383.700 de la Hoja Jaruco.

Descripción. En el corte de Marbella (localidad tipo) en la paleoduna se encuentran cuatro generaciones de eolianitas, separadas por capas delgadas de paleosuelo arcilloso rojo. Cada generación de calcarenitas no supera en espesor los 3 a 5 m, y tienen una orientación de las capas que sugiere un flujo del viento en dirección al Suroeste. Contienen restos de moluscos terrestres (Figura 7).



Fig. 7. Formación Guanabo en la localidad tipo, aspecto de la laminación cruzada y detalle de los moluscos terrestres (*Serium* sp.) que contiene la eolianita.

Por debajo de las eolianitas se encuentra un nivel de paleosuelo y una autobrecha cárstica de calizas recristalizadas de la Formación Cojímar (Figura 8), con travertinas depositadas por un manantial ya extinto. Otras dunas alineadas con esta en los alrededores de Guanabo yacen sobre las formaciones Husillo, Cojímar, Güines, o sobre autobrechas de estas mismas rocas.



Fig. 8. Afloramiento de la Formación Guanabo en Marbella (localidad tipo).

Edad. La Formación Guanabo se considera, de acuerdo a su posición estratigráfica, del Pleistoceno inferior a medio.

Ambiente sedimentario. La Formación Guanabo constituye sistemas de paleodunas costeras del Pleistoceno. Su origen se relaciona con el acarreo por el viento, tierra adentro, de las arenas calcáreas de las paleo-playas. Es de destacar que entre Bacuranao y El Rincón de Guanabo la plataforma insular actual es más ancha, lo que permitió la acumulación de grandes volúmenes de arena que sirvió de fuente a la formación de playas y dunas.

Formación Jaimanitas (Brödermann 1940).

Esta es la más común de las formaciones calcáreas marinas de las costas de Cuba, que coincide con la Terraza de Seboruco, representando una importante transgresión marina del Pleistoceno superior.

Brödermann (1940) la utiliza en el mapa geológico y en 1943, en la columna geológica indica la localización en las "Canteras de Jaimanitas". La verdadera descripción de la formación la ofrecen Brödermann y Bermúdez (1940) en "Contribución al mapa geológico de la provincia de la Habana", informe de la Comisión del Mapa Geológico de Cuba, Ministerio de Agricultura (Manuscrito mecanografiado inédito, de 414 pp., 40 fotos y 6 planos). En la pág. 413, al pie de la foto 38 dice: "Localidad típica del Pleistoceno (Formación Jaimanitas). Estación J. 198, corte en el cruce de la carretera a Jaimanitas con la calle al Biltmore Yacht Club, a unos 800 metros al sur de la playa". Esa misma foto la reproduce Ducloz (1963). La localidad que Brönnimann y Rigassi (1963) señalan como típica "... cantera abandonada cerca de La Areca, área del Biltmore...", está a 150 metros al

noreste del punto de documentación original *J. 198*, pero en la actualidad todos estos puntos han desaparecido bajo obras constructivas.

Aparentemente, tanto Brödermann como Bermúdez usaron el término Jaimanitas de una manera amplia, para todos los depósitos costeros cuaternarios, tal como se infiere de sus descripciones (Brödermann 1940, 1943; Bermúdez 1950). Sin embargo, Bermúdez (1961, p. 103) ya delimita la formación como un "arrecife costero de 2 m de altura con muchos macrofósiles". En la localidad tipo de Jaimanitas, según Ducloz (1963), son cretas, calcarenitas y arena con estratificación cruzada, separadas estas últimas por un horizonte de suelo. Más adelante señala que hacia el norte y noroeste (hacia la costa), pasan lateralmente a calizas francamente coralinas. Siguiendo esta misma tónica, Brönnimann y Rigassi (1963 p. 204) describen la formación como "calcarenitas endurecidas blancuzcas a amarillentas con abundantes peneróplidos y fragmentos de algas, en capas finas, ocasionalmente con estratificación cruzada. También capas de conchas, conglomerados y depósitos arrecifales asociados con calcarenitas... y formaciones de coral".



Fig. 9. Terraza de Seboruco de la Formación Jaimanitas en La Chorrera, Malecón y 18, Vedado.

Las calcarenitas que tanto Brönnimann y Rigassi como Ducloz ubican en la Formación Jaimanitas no son solamente eólicas, ya que pueden representar una facies arenosa de barra, playa y duna, donde es posible encontrar estratificación cruzada (ver Shantzer, Petrov y Franco 1975, en su figura 13). Por eso Albear e Iturralde-Vinent (1985) restringieron la Formación Jaimanitas a los depósitos de plataforma carbonatada, tanto arrecifales como de laguna marina, tal como hicieron originalmente Brödermann y Bermúdez (1940), que son las facies que aparecen comúnmente formando la Terraza de Seboruco (Figura 9).

En la región de Cuba sudoriental también está presente la terraza de Seboruco constituida por las calizas coralinas de la Formación Jaimanitas. En algunas localidades, como al sur de Nima Nima y Buey Cabón estas rocas yacen discordantes sobre las plutonitas del Paleógeno (Figura 10).



Fig. 10. Afloramiento de la Formación Jaimanitas en la terraza de Seboruco, costa al sur de la Sierra Maestra. A. Calizas coralinas, cerca de Chivirico. B. Discordancia basal, cerca de Buey Cabón.

Localidad tipo. Corresponde a la Estación *J. 198* (Brödermann 1940), pequeño corte junto al cruce de la antigua carretera de Jaimanitas (Calle 230) con la 5ta Avenida, coordenadas: x348,050 y362,470, hoja La Habana 3785 III.

Descripción. La Formación Jaimanitas, en sentido estricto, la constituyen los depósitos arrecifales de la terraza marina acumulativa situada, en general, hasta 10 m de altura, comúnmente, entre 2 y 5 m, sobre el nivel del mar. La franja litoral que ocupan, como promedio, tiene una anchura de 1 a 1,5 kilómetros, pero se acuña en algunos tramos.



Fig. 11. Afloramientos de la Formación Jaimanitas, donde se reflejan dos ambientes, el de arrecife coralino (izquierda) y el de llanura de seibadal (derecha). Terraza Seboruco, en Cojímar. Foto cortesía de R. Rojas.

La formación se compone de calcarenitas y calizas arrecifales, tanto biodetríticas como biohémicas, masivas, porosas, de color crema-amarillento, en ocasiones con capas de lumaquela. Un rasgo común en ellas es la presencia de tres ambientes (Figuras 11 y 12). El de arrecife coralino con colonias de corales en su posición original, el de depósitos retroarrecifales con corales fracturados y ambiente de laguna con moluscos y equinodermos en matriz calcarenítica. Su potencia no se ha medido, pero es probable que no supere los 10 m. En ocasiones presenta lentes

e intercalaciones de calcarenitas de grano medio bastante consolidadas y margas terrosas de color amarillo.

En localidades como Cojímar y al este de Boca de Jaruco, así como en la cantera situada en playa Baracoa, se observan los ambientes de arrecifes con masas de *Porites* y otros corales masivos *in situ*, y capas con corales fragmentados y volcados, asociados con capas ricas en fragmentos de *Acropora digitata* y *A. palmata*, que probablemente representan depósitos de tormenta provenientes de arrecifes de barrera. Lateralmente se encuentran calcarenitas con *Strombus gigas* y equinodermos, propios de los ambientes de laguna con pastos de seibadal.



Fig. 12. Calizas de las Formación Jaimanitas con *Strombus gigas* típico de las llanuras de seibadal, Varadero. Esta formación se caracteriza por la buena preservación del aragonito en las conchas calcáreas.

Estas calcarenitas, que pueden presentar laminación inclinada y cruzada, yacen en discordancia sobre las formaciones Vedado, Morro y Güines; en las cuales se encuentra a menudo una escarpa abrasiva marina, con una muesca (notch) de marea bien desarrollada, probablemente isócrona con la sedimentación de Jaimanitas (Figura 13).

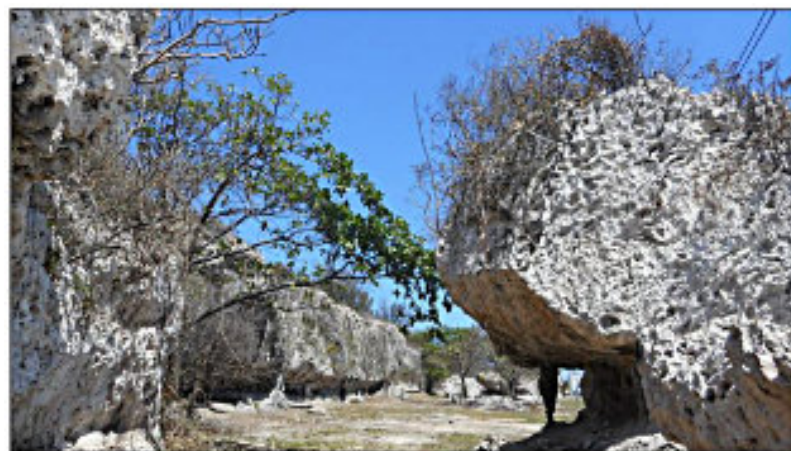


Fig. 13. Nicho de marea en la pared de la segunda terraza al fondo e incisos en bloques desprendidos de ella (derecha), isócronos con la sedimentación de la Formación Jaimanitas. La costa está a la derecha. Zona Industrial Matanzas.

Entre Jibacoa y Arroyo Bermejo la formación presenta una facies conglomerática, constituida por calizas biodetríticas con fragmentos bien redondeados de rocas ígneas, de diámetro menor que 5 cm. Estas facies constituyen sectores de la plataforma insular a donde llegaron los aluvios de ríos que drenaban las tierras emergidas. La formación se cubre a veces por arenas y arcillas arenosas recientes, y presenta cavidades de disolución rellenas con arena gravosa cementada por arcilla roja carbonatizada. En algunos lugares yace bajo la Formación Santa Fe.

Tanatocenosis y edad. Brödermann y Bermúdez (1940) reportan los siguientes moluscos de la localidad tipo: *Lucina pensilvanica*, *Codakia orbicularis*, *Cardium* sp., *C. isocardia*, *Glycymeris* sp., *Macoma constricta*, *Tellina* sp., *T. interrupta*, *T. laevigoba*, *Myztaca* sp., *Astrae (Astralum)* sp., *Natica mammillaris* y *Bulla striata*. Cabrera y Peñalver (2001) relacionan los fósiles de esta formación en otras localidades, incluidos: moluscos (*Strombus gigas*, *Anadara notabilis*, *Argopecten nucleus*, *Lucina jamaicensis*, *Chione cancellata*, *Astrea brevispina*, *Chalamy (Feguipecten) museosus*, *Linga pensilvanica*, *Natica canrena*, *Politices lacteus*, *Bulla occidentalis*, corales (*Porites* sp.), foraminíferos (*Archaias angulatus*, *Ammonia beccarii* y algas (*Jania* y *Amphiroa*). La edad de la formación es Pleistoceno Medio a Superior, pues tiene por debajo la Formación Vedado y por encima la Formación Santa Fe, ambas del Pleistoceno. Según Dunaev e Ionin (1975) su edad oscila entre 100 y 130 ka. Muhs et al. (2019) la fecharon en ~ 130 a ~ 119 ka en un afloramiento de Jaimanitas en la Bahía de Guantánamo.

Ambiente sedimentario. Las rocas de esta formación representan un ambiente de plataforma insular, desde el arrecife hasta la playa. Corresponden con una fase transgresiva bastante estable, que cubrió las zonas bajas en el Pleistoceno Superior. La salinidad del mar somero era normal pues apenas en algunos tramos se redujo ligeramente, coincidiendo con el eventual acarreo de material clástico transportado por los ríos.

Formación Cocodrilo (Franco y de la Torre 1980).

Localizada en los cayos de la ensenada de la Broa y en la costa sur de Isla de la Juventud.

Localidad tipo. Entorno del caserío Cocodrilo, situado al Sur de la Isla de la Juventud.



Fig. 14. Aspecto de las calcarenitas de la Formación Cocodrilo, cortadas por un nicho de marea a 1.5 - 1.7 metros de altura. Cayo Piedra (Iguana) cerca de Cayo Largo del Sur.

Descripción. Son calcarenitas oolíticas y pseudoolíticas, bien seleccionadas, de grano fino a medio, cementadas, muy porosas, con laminación cruzada, de origen eólico, que forman una serie de colinas bajas (paleodunas) subparalelas a la costa sur de la Isla de la Juventud. La misma litología y morfología se observa en Cayo Largo del Sur y sus alrededores, donde las paleodunas constituyen colinas paralelas, alargadas de NE a SW, que suman más de una decena. El espesor de las eolianitas alcanza 4, 5 hasta 8 metros en cada colina. En la localidad tipo se supone cubierta por la Formación Jaimanitas.



Fig. 15. Paleoduna de la Formación Cocodrilo, en proceso de erosión, Costa sur de Cayo Largo del Sur.

Tanatocenosis y edad. No se han reportado fósiles hasta ahora. La posición estratigráfica la ubica en el Pleistoceno Superior, anterior al último interglaciador, pues las paleodunas de Cocodrilo están cortadas por un nicho de marea situado a 1.5 - 1.8 metros de altura (Figuras 14 y 15), que probablemente corresponda al nivel MIS 5 (Figura 1), fechado entre 118 y 132 mil años (Hearty y Conrad Newman 2001), aproximadamente la edad de la Formación Jaimanitas.

Ambiente sedimentario. Constituye un sistema de paleodunas costeras formadas por el acarreo por el viento tierra adentro, a partir de las arenas calcáreas oolíticas de las paleo-playas y barras.

Formación Romano (Iturralde-Vinent 1981).

Sin justificación alguna Cabrera y Peñalver (2001) proponen desestimar esta unidad. Sin embargo, esta es cartografiable, aflora bien, tiene una litológica característica y fue publicada oportunamente.

Localidad tipo. Tiene su localidad tipo en la porción inferior de los taludes de la colina denominada Silla de Cayo Romano (Figura 16) y sus alrededores, por el camino a Versalles, donde su espesor alcanza las decenas de metros. Las coordenadas son x847.40 y244.50 hoja Pasa Guajaba. Depósitos equivalentes afloran colinas de la costa norte de la isla de Cuba en Punta Alegre y loma de Judas de la Cunagua (Iturralde-Vinent, Tchounev y Cabrera 1981) y en los cayos Ballenatos (Cabrera *et al.* 1997).



Fig. 16. Posición de los depósitos de la Formación Romano rodeando el talud de la elevación constituida por la Formación Alegrías.

Descripción. Son sedimentos de talud, que yacen en la mitad inferior de las laderas de las elevaciones, con características muy peculiares. En la sección tipo Iturralde-Vinent (1981) las describe como "calizas oolito-pseudo-oolíticas de color rojizo oscuro". Los oolito-pisolitos varían entre milímetros y 5 cm de diámetro de color pardo oscuro a negro. La matriz calcárea terrosa rojiza es más clara. Los pisolitos y pseudoolitos tienen capas concéntricas de calcita con núcleos de caliza o moluscos. Algunos gastrópodos están rellenos de oolitos y fragmentos de roca cementados por un carbonato de color marrón oscuro. En la parte alta del talud de la loma los pisolitos son mayores (hasta 5 cm) y hacia la base se hacen más pequeños y dominan los pseudoolitos, que lateralmente disminuyen de tamaño y abundancia hasta transicionar con las calizas coralinas de la Formación Jaimanitas. En la localidad tipo yace sobre la Formación Alegrías. En Cayo Romano, por el camino de Versalles hacia el oeste, Iturralde-Vinent (1981) documentó la transición lateral con la Formación Jaimanitas, aquí representada por calizas biógenas coralinas y biocalcarenitas. En los cayos Ballenatos la Formación descansa discordante sobre rocas del Eoceno Superior, que constituyen los núcleos de los pisolitos. El espesor de estas capas en general no supera las decenas de metros, medida respecto a la pared de las elevaciones.

Edad. Su edad se considera como isócrona de la Formación Jaimanitas, es decir, Pleistoceno superior.

Formación Santa Fe (Brönnimann y Rigassi 1963)

Descripción. Son eolianitas que afloran extensamente al noroeste de la ciudad de La Habana, entre Santa Fe y Mariel, formando un cordón de paleodunas que se destacan muy bien en las fotos aéreas. En esta región yacen sobre una unidad de calcarenitas más antigua, incluida por Brönnimann y Rigassi (1963, p. 205) en la Formación Jaimanitas. También afloran entre Bacuranao

y El Rincón de Guanabo, topográficamente por debajo de aquellas reconocidas como Formación Guanabo. Posiblemente se correlacione con la Formación Guillermo en los cayos de la costa norte del archipiélago Sabana-Camagüey.

Localidad tipo. La Formación Santa Fe aflora típicamente en un corte de la carretera La Habana-Mariel, junto al oeste de Santa Fe (Figura 17), entre los puntos de coordenadas (x 344,000; y 360,250) y (x 342,500; y 359,000) de la Hoja Santa Fe.

Descripción. Entre Jaimanitas y Mariel, por la costa Norte, la Formación Santa Fe aflora dando lugar a unas colinas alineadas, paralelas a la costa actual. Su altura media es del orden de los 20 hasta los 30 m. La anchura de las colinas no supera los 600 m, pero pueden alcanzar una longitud de 3 km.



Fig. 17. Afloramientos de la Formación Santa Fe en su sección tipo, donde se observa: A. La posición de las eolianitas sobre un paleosol en calizas brechadas carstificadas. B. Laminación inclinada de las calcarenitas acumuladas por el viento soplando desde el este.

En esta sección la unidad se compone de calcarenitas blancas amarillentas a color gris; de grano medio, distintamente consolidadas, muy porosas. Tienen laminación cruzada, en capas desde pocos milímetros hasta 2 cm, con buzamiento desde 0 a 30° al Norte y rumbos próximos. El espesor de la capa alcanza probablemente más de 10 m. En varios cortes se observa que el techo de las colinas de calizas está coronado por una capa horizontal de calcarenitas, de 1 m de espesor. Las calcarenitas descritas yacen sobre un paleosol, constituido por una capa irregular de arena arcillosa roja, de 20 cm de potencia en algunos lugares, bajo la cual se encuentran calizas alteradas, probablemente de una facies de playa de la Formación Jaimanitas según Shantzer, Petrov y Franco (1975).

Al este de la Habana, entre Bacuranao y Rincón de Guanabo se encuentran varias paleodunas pequeñas, a menos de 600 m de la costa, con una altura no mayor de 10 m sobre el nivel del mar. En general están constituidas por calcarenitas de grano medio, porosas, de color blanco crema, que se altera a gris con manchas rojas, en capas laminares que forman conjuntos de 20 cm de espesor. Estas capas buzcan entre 0 y 30° y presentan frecuentes truncaduras. Por el contrario, las paleodunas alineadas cerca de la costa, yacen sobre las formaciones Jaimanitas y Vedado, y por excepción, sobre Güines.



Fig. 18. Formación Santa Fe en la península de Hicacos. A. Relicto de un afloramiento pues la altura original fue cortada por obras civiles. B. Afloramiento en Cueva Ambrosio

En la península de Hicacos también hay afloramientos de calcarenitas con estratificación cruzada y truncada, que forman colinas que alcanzan 10 metros de altura (Figura 18), donde se desarrollan pequeñas cavernas. Forman colinas alargadas por el eje NE a SW.

Tanatocenosis y edad. La asociación de los restos fósiles en la localidad tipo incluye *Ammonia beccarii*, *Elphidium* spp. redepositados de los ambientes marinos, así como moluscos terrestres costeros: *Cerion tridentatum* y *Vanatta* sp. (Torre y Kojumdjieva 1985). La Formación Santa Fe es isócrona y más joven que Jaimanitas. Ocupa la misma posición estratigráfica que la Formación Guillermo. Todo esto la ubica dentro del Pleistoceno tardío.

Ambiente sedimentario. La Formación Santa Fe constituye un sistema de paleodunas costeras del Pleistoceno. Su origen se relaciona con el acarreo de las arenas calcáreas, tierra adentro, por el viento.

Formación Guillermo (Iturralde-Vinent 1981).

Aflora bien en las costas acantiladas de los cayos Guillermo, Contrabando, Hijos de Guillermo y otros de la costa norte de Cuba, formando colinas (dunas fósiles) de dirección N-S y E-W, que alcanzan los 15 m de altura, las que en superficie presentan una incipiente karstificación.

Localidad tipo. Su área tipo son las dunas fósiles de los cayos Guillermo, Contramaestre, Coco e Hijos de Guillermo, constituyendo alturas que alcanzan los 10 a 12 metros. En cayo Guillermo son colinas situadas a lo largo de la costa norte, que actualmente están siendo erosionadas por la acción del oleaje. Su sección tipo está en el extremo NE del cayo, con las coordenadas x736.48 y311.02 de la hoja Cayo Guillermo.

Descripción. Según Iturralde-Vinent (1981) en el área tipo son "calcarenitas con laminación cruzada que yacen sobre la Formación Jaimanitas" ... que en la sección tipo incluyen... "calcarenitas pseudoolíticas, biocalcarenitas y calizas biodetríticas con matriz micrítica, todas de grano medio a grueso, con bioturbaciones, que alcanzan 10 metros de espesor". Iturralde-Vinent y Cabrera (1998) añaden que se componen de wakestone-grainstone oolíticas, pseudoolíticas y biodetríticas. En su área y sección tipo (las dunas de Cayo Guillermo) no se encuentran macrofósiles, pero hay detritos de algas, miliólidos, Soritidae y equinodermos. Se observan hasta

tres paquetes de capas con laminación cruzada e inclinación de 0 a 30° al NE, S y SE, separados por superficies levemente alteradas. Yacen sobre la Formación Jaimanitas y se cubren por la Formación Los Pinos, y los complejos de duna-playa actuales. Se le han considerado como las dunas más elevadas de Cuba, sin embargo, realmente son paleodunas (inactivas) y su altura depende de la granulometría e intensidad de los vientos, no de causas tectónicas necesariamente.

Edad. Según su posición estratigráfica la Formación Guillermo se puede considerar del Pleistoceno Superior, probablemente isócrona con la Formación Santa Fe (Iturralde-Vinent, Tchounev y Cabrera 1981; Albear e Iturralde-Vinent 1985).

HOLOCENO

Formación Los Pinos (Iturralde-Vinent 1981).

Localidad tipo. Su área y sección tipo se encuentra en Playa Los Pinos, al W de Punta Central en Cayo Sabinal, Archipiélago Sabana-Camagüey.

Descripción. La Formación Los Pinos, según Iturralde-Vinent (1981) está constituida por "depósitos de playas, barras y dunas costeras subrecientes". Iturralde-Vinent y Cabrera (1981) añaden que se trata de wakestone, grainstone y boundstone con granos subangulares a redondeados, bien seleccionados, débilmente cementados por contacto, de color blanco amarillento a rosáceo, en ocasiones con conchas de microorganismos marinos y de moluscos terrestres. Constituye conjuntos de paleo-barras, paleo-playas, paleodunas y paleo-bancos de arena marina, que forman colinas de hasta 5 m de altura y decenas de metros de largo. Están débilmente litificadas y presentan laminación cruzada, con capas inclinadas de 0 a 30° al NE, S y SSW. Su espesor máximo (12 m) lo alcanzan en Cayo Coco. La Formación Los Pinos yace sobre las formaciones Jaimanitas y Guillermo, separada por una corteza de intemperismo arcilloso-carbonatada de color rojo, de varios centímetros de espesor. También por debajo de las arenas de playa-duna recientes hay parches de una fina capa de suelo, como por ejemplo en Playa Santa Lucía (Camagüey), donde están presentes moluscos terrestres. Iturralde-Vinent (1981) destaca que por debajo de los depósitos recientes de arenas y turbas hay calcarenitas consolidadas que se pueden relacionar a la Formación Los Pinos, expuestas en las playas erosionadas de Varadero (Matanzas), Santa María del Mar (La Habana), Ancón (Cienfuegos); así como en excavaciones en el interior de cayos bajos arenosos, como los de Doce Leguas, los Jardinillos y Jardines, al sur de Camagüey.

Edad. De acuerdo a su posición estratigráfica la formación tiene edad Holoceno temprano, acumulada durante una transgresión (probablemente la transgresión flandriana, MIS1) cuando los mares ocuparon un nivel superior al actual, que se puede calcular en 2 o 3 metros a juzgar por la altura que alcanzan los depósitos propiamente marinos.

DEPÓSITOS TERRESTRES

Algunos sedimentos de origen terrestre presentes en costas bajas pantanosas, playas, así como en llanuras y valles intramontanos han sido como unidades litoestratigráficas, aunque se incluyen determinados suelos. Algunos autores (Kartashov *et al.* 1976, 1981; Cabrera y Peñalver 2001)

propusieron que algunos de estos depósitos como de origen marino, pero ese criterio ha sido debatido ampliamente y aquí no se acepta. De hecho, estos sedimentos son de origen terrestre: eluvial, eluvio-deluvial, aluvial y aluvio-lacustre, los cuales rellenan depresiones kársticas o cubren las partes menos denudadas del relieve. En lo sucesivo se caracterizan brevemente algunos de estos tipos de depósitos, para los cuales se abandona la terminología de "formación" por tratarse de capas poco consolidadas. Un problema que está por resolver es el fechado de la mayoría de estos depósitos, pues por lo general sus edades son estimados.

Lateritas ferroniquelíferas.

En Cuba son comunes los afloramientos de las rocas máfico-ultramáficas donde están desarrolladas lateritas ferroniquelíferas, especialmente en Cajalbana (Pinar del Río), San Miguel de los Baños (Matanzas), San Felipe (Camagüey) y Mayarí-Baracoa (Holguín-Guantánamo). Un gran número de investigaciones han sido publicadas sobre estos depósitos (Buguel'skiy 1979, Formel 1979, Laverov 1985, Proenza *et al.* 2003, 2007), debido a que son fuente de níquel, cobalto, hierro, magnesita, calcedonia y otros elementos de importancia económica. Estas cortezas alcanzan decenas de metros de espesor en algunas localidades y presentan una zonación vertical que se ha caracterizado detalladamente en los trabajos antes citados.

La edad de las lateritas se ha considerado como Plioceno-Cuaternario, aunque hay evidencias de que comenzaron a formarse, al menos, desde principios del Mioceno (Laverov 1985, Formel Cortina y Buguel'ski 1974). En la Formación Magantilla del Mioceno de Camagüey hay abundantes materiales (magnesita y calcedonia) redepositados desde la sección inferior de las cortezas de intemperismo ferruginosas.

Depósito tipo La Gloria (Formel Cortina y Buguel'ski 1974)

Son depósitos de color rojo violáceo saturados de concreciones ferruginosas tipo perdigón que según Formel Cortina y Buguel'ski (1974) ocurren en San Miguel de los Baños (Matanzas), en Sierra de Cubitas y la llanura norte de Camagüey. Estos autores demuestran que estos depósitos no son "terra rosa" o suelos *in situ*, aunque descansan sobre calizas carstificadas. Nuñez, Panos y Stelcl (1967) les definen como cortezas de intemperismo (lateritas) redepositadas. En San Miguel de los Baños, entre Coliseo y Limonar, Formel y Buguel'ski (1974) describen estos sedimentos sobre las calizas del Mioceno. Formel, Buguel'ski e Iturralde Vinent (en Iturralde-Vinent, Tchounev y Cabrera 1981) definen para estas capas la "Formación La Gloria", con área característica en los alrededores de Sola, con sección tipo en la cantera situada 2.3 km al SW de La Gloria, en las coordenadas x845.35 y213.25 hoja Sola.

En Camagüey este tipo de depósitos está formado por conglomerados ferruginosos con cantos rodados constituidos por fragmentos de hardpan en cantidades variables, embebidos en una matriz pelítica ferruginosa. En su base pueden presentar clastos de calcedonia a manera de un conglomerado basal. Su estratificación es imperfecta, quizás borrada por la lateritización secundaria. Su color es rojo oscuro a marrón, amarillo-carmelitoso y pardo. Llega hasta 30 metros de espesor. Yacen sobre calizas del Cretácico al Mioceno, localmente sobre arcillas tipo Guevara.

Son producto lateríticos redepositados desde la corteza de intemperismo de las ultramafitas, cuyos relictos quedan en la meseta de San Felipe, loma de Hierro y sus alrededores (Figura 26). Un perfil característico lo muestra el pozo Sola 3 (perforado a 6.5 km al WSW de Sola), que sobre calizas cretácicas encontró 16,4 metros de conglomerado con clastos de hardpan ferruginoso, desde subangulosos hasta redondeados y perdigones aislados; en una matriz de arcilla roja. El pozo Sola 4 (2 km al NW de la Escuela Sola II), cortó 24 metros de conglomerados de perdigones y fragmentos de hardpan, homogéneos, de color marrón, con una laminación imperfecta en ciertos horizontes.

La edad de estos depósitos es posterior al levantamiento de la Sierra de Cubitas y la formación de los cauces que la atravesaban de sur a norte, un evento que se ha fechado tentativamente como del Plioceno. Por tanto, los depósitos tipo La Gloria pueden ser del Plioceno al Pleistoceno (Iturralde-Vinent, Tchounev y Cabrera 1981). Sin embargo, el proceso de redepósito de las cortezas lateríticas pudo comenzar en el Mioceno, pues la Formación Magantilla del Mioceno contiene abundantes productos del intemperismo de las rocas máfico-ultramáficas. En Cuba oriental y San Miguel de los Baños también se han descrito cortezas "redepositadas", con fósiles del Mioceno (Laverov 1985, Formel y Buguelski 1974).

Depósito tipo Ensenada Grande (Acevedo y Gutiérrez 1974) (Sinonimia: "formación Guane").

Son conglomerados, gravas, arenas y arcillas arenosas, débilmente consolidados por una matriz de arcilla, de colores abigarrados (rojo, gris y amarillento). Presentan estratificación lenticular y más raramente inclinada. El material clástico es anguloso y subanguloso, con predominio de rocas silíceas. La matriz aparece en las partes intemperizadas como arcilla caolinítica, hidromicáceo-caolinítica y esmectítica. En la parte alta del corte se encuentran ferricretas (concreciones ferruginosas y hardpan). Alcanza hasta 50 m de espesor. Se dispone en Cuba occidental, formando pequeñas colinas. Son depósitos aluviales, deluviales y lagunares. Dzulynski *et al.* (1984), precisan algunos detalles importantes de este depósito. Iturralde-Vinent, Tchounev y Cabrera (1981) describen con detalle varios afloramientos y registros de pozos que cortaron capas equivalentes en Ciego de Ávila, Camagüey y Las Tunas.

Depósito tipo Guevara (Cabrera y Peñalver 2001).

Según Cabrera y Peñalver (2001) son capas de arcillas plásticas (montmorilloníticas y montmorillonito-caoliníticas), arenas, gravas finas, fragmentos de corazas ferríticas (hardpan) y clastos de rocas silíceas. La matriz es esmectítica, esmectítica alumino-ferruginosa y caolinito-esmectítica. Contiene abundantes pisolitos y nódulos ferríticos. Carece de estratificación. Su coloración es abigarrada (roja, gris y amarillenta). Sobreyace los depósitos tipo Ensenada Grande y se cubre por los depósitos tipo Manguito. Está presente en Cuba central y occidental. Son sedimentos de lagunas terrestres, muy intemperizados. Dzulynski *et al.* (1984), precisan algunos detalles importantes sobre las características y origen de este tipo de depósito en Matanzas. Iturralde-Vinent, Tchounev y Cabrera (1981) describen con detalle varios afloramientos y registros de pozos que cortaron capas equivalentes en Ciego de Ávila, Camagüey y Las Tunas, sobre todo donde están desarrolladas las calizas del Mioceno (Figura 18).

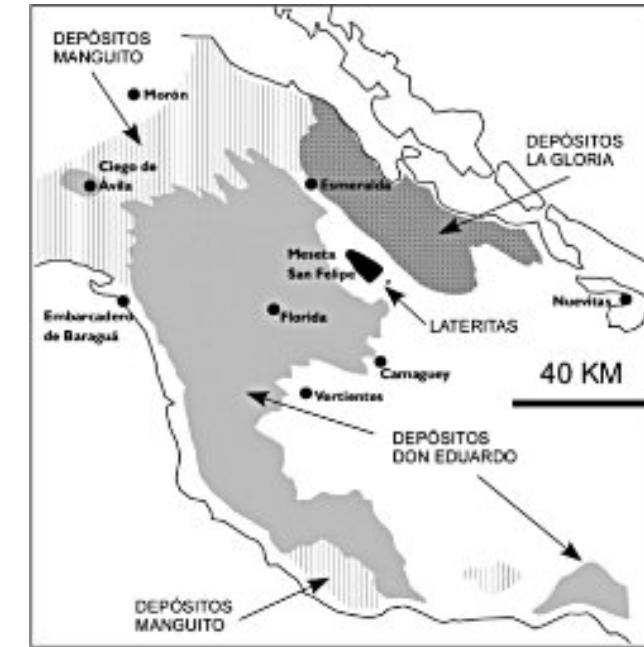


Fig. 18. Croquis de la distribución de los depósitos cuaternarios terrestres en Ciego de Ávila y Camagüey.

Depósito tipo Don Eduardo (Iturralde-Vinent 1981)

Son depósitos muy característicos y cartografiables que se distribuyen en el área central del territorio cubano desde Matanzas hasta Las Tunas (Figura 18). Su área tipo se definió como la llanura peniplanada al sur de Céspedes, con sección tipo en una cantera abandonada en el camino que entronca al sur con la carretera central, 1.5 km al NW de Don Eduardo, con las coordenadas x771.70 y205.70 hoja Céspedes.

Yacen sobre depósitos tipo Guevara, y rocas del Mioceno o más antiguas. Se cubren localmente por arcillas grises o abigarradas gris-rojizo verdosas y por sedimentos holocénicos de distinto tipo. Su espesor varía entre 3 y 5 metros, de los cuales la parte superior puede estar lateritizada formando una fuerte coraza tipo hardpan.

Según el pozo Céspedes, perforado en la cantera tipo de Don Eduardo, este depósito se caracteriza de arriba hacia abajo por:

- 3 m de agregado de perdigones ferruginosos de diámetro menor de 1 cm, de contorno suboval a subangular, que constituyen el 60 a 70% del volumen, embebido en una matriz areno-pelítica ferruginosa. Hasta los 2 metros es de color rojo marrón oscuro y más abajo rojo amarillento.
- 11 m de arcillas abigarradas gris-amarillo-rojizo sin perdigones tipo Guevara
- 2 m de arena arcósica compacta, homogénea, fina, de color gris claro que sobreyace las calizas del Eoceno. Iturralde-Vinent (1981) describe en detalle numerosos afloramientos y registros de pozos en Camagüey y Las Tunas, con depósitos típicos de Don Eduardo.

Estas rocas no constituyen una corteza de intemperismo *in situ*, pues sobreyacen tobas, calizas, arcillas, arenas y granitoides. Probablemente son el resultado del redepósito de los materiales

ferruginosos derivados de la corteza laterítica de las ultramafitas situadas al norte, los que han soportado una alteración laterítica secundaria, ya en su lugar de acumulación. Por eso en algunos lugares representan cortezas de intemperismo de concreciones ferruginosas (hardpan) (Dzulynski *et al.* 1984; Iturralde-Vinent 1967), que descansan sobre formaciones kársticas y rocas ígneas con espesor de varios centímetros y hasta unos metros.

Depósito tipo Manguito (Iturralde-Vinent 1967). (Sinonimia: "formación" Villarroja).

Tiene su localidad tipo en una exposición situada cerca de Manguito, provincia de Matanzas, en el punto de coordenadas x306.5 y516.6, de la hoja Manguito 4083-IV. Son arcillas arenosas y areno-limosas, arenas arcillosas y arenas cuarzosas de distintas granulometrías, pigmentadas por hidróxidos de hierro (goethita). Puede contener finos lentes y capas de grava, con granos de cuarzo y otros minerales; también fragmentos de hardpan. Las arcillas son principalmente esmectita y caolinita. Presenta tonalidades variables de rojo amarillento a rojo violáceo. Su espesor varía entre 2 y 40 m. En otras localidades son cortezas redepositadas, e intercaladas con materiales de distinta composición. Se encuentran desde La Habana hasta Las Tunas. Dzulynski *et al.* 1984 presentan observaciones importantes sobre las características de este tipo de suelo ferralítico y lo define como terrestre.

Es incorrecto atribuirle a Manguito todos los depósitos o capas de color rojo, pues depósitos similares pueden originarse en distintas etapas del desarrollo subaéreo del territorio. Por ejemplo, capas de arcillas rojas con o sin perdigones subyacen a la Formación Jaimanitas y forman capas intercaladas entre las calcarenitas de las formaciones Guanabo, Santa Fe, Guillermo y Los Pinos.

Según la descripción original de Manguito estos son "saprolitas" de caliza, de color rojo sangre a rojo-pardo, constituida por limos y arcillas rojas, deleznable, con abundantes perdigones de limonita de hasta 4 cm de diámetro, sobre todo en la parte superior. En su área tipo contiene granos de cromita, circón, feldespato rosado e incoloro, cuarzo incoloro y rosáceo. En otras regiones donde se le ha cartografiado como "formación Villa Roja" la capa superior de perdigones puede no estar presente. En el área tipo de los depósitos Manguito, los pozos cortan 18 y más metros de espesor, lo que descansa sobre las formaciones Güines y Colón. En Ciego de Ávila abarca casi toda la extensión donde afloran las calizas y margas del Mioceno (Figura 18), pero lateralmente transiciona en los depósitos tipo Don Eduardo, más ricos en perdigones y con un color cercano al café oscuro.

Su suprayacente son por lo general sedimentos del Holoceno, de modo que su edad es difícil de precisar. Iturralde-Vinent (1967) definió su origen como terrestre. Probablemente la concentración de hierro en estos depósitos sea debido al aporte de los vientos del Sahara y al redepósito de las cortezas de intemperismo de las rocas máfico-ultramáficas.

Depósito tipo Siguanea (Cabrera y Peñalver 2001).

Se reportan de la Isla de la Juventud y en la llanura sudoccidental de Pinar del Río. Según Cabrera y Peñalver (2001) consisten de arenas cuarzosas con intercalaciones de gravas y arcillas limosa, que contienen fragmentos de hardpan y minerales pesados. Colores blancuzco, amarillento o gris, raramente rojizo. No excede los 10 m de espesor. Sobreyace rocas pre-cuaternarias y las

formaciones Ensenada Grande y Guevara, de manera que su edad puede corresponder al Holoceno temprano. Son depósitos de llanura acumulativa aluvio-lagunar.

Depósito tipo Burro (Shopov e Iturralde-Vinent en Iturralde-Vinent 1981)

Se propuso este nombre para unas capas de arcillas que yacen por debajo de turbas, depósitos de lagunas y pantanos recientes, lo que fija su edad en Pleistoceno a Holoceno temprano. En la sección tipo, en la costa erosionada, se encuentran 60 cm de arcillas grises plásticas con abundantes micromoluscos, que se cubren por arenas conchíferas actuales. El pozo Júcaro perforado 300 m al NE de Júcaro (Ciego de Ávila), colindante con la sección tipo, cortó de arriba hacia abajo:

- 20 cm de arcillas rojas con perdigones
- 30 cm de arcillas plásticas, gris con restos de vegetales carbonizados
- 50 cm de arcillas grises con fragmentos de calizas intemperizadas
- 1.8 m de arcilla plástica gris oscuro, con abundantes microgastrópodos marinos y finas intercalaciones de arena fina,
- 1.10 m de arcillas con fragmentos angulosos de arcilla roja con perdigones
- 2.0 m de arcillas rojizas color ladrillo con restos orgánicos carbonizados y escasos fragmentos de caliza
- 1 m de conglomerados de fragmentos de calizas alteradas con matriz de arcilla roja con perdigones
- 1 m de arcilla roja sin perdigones con fragmentos de caliza
- Calizas de la Formación Güines del Mioceno.

Otra sección de 50 cm de arcillas de color blanco a crema, plásticas, ricas en microgastrópodos, se encuentra en un canal del antiguo embarcadero de Guayaba, en la costa sur. Al oeste de Jaronú (Camagüey) en un canal que corta el pantano actual, se descubren al menos 2 metros de arcillas arenosas, gris oscuro, con microgastrópodos y oogonios de carofitas. En Laguna de la Leche (norte de Ciego de Ávila) son arcillas azuladas y pardo amarillentas, de consistencia muy plástica y fluida, que en la base contienen del 10 al 60 % de material gravoso. Yacen sobre calizas del Mioceno (?) y se cubren por margas ricas en microorganismos de agua dulce y turbas (Martashvili y Luege 1968). Todos estos son depósitos de laguna litoral de agua dulce, que son anteriores a los depósitos actuales de manglares que ocupan algunas costas bajas.

Depósitos tipo Altamira (Iturralde-Vinent 1981).

En la costa sur de Camagüey, entre Punta Remate y Punta Polizón, se desarrolla una faja de ciénaga costera donde aparecen tramos donde los sedimentos de pantano han sido arrancados y están expuestas arenas que forman extensas playas. Estas playas están compuestas por depósito de dos tipos: uno inferior más antiguo que se denominó Altamira, y otro superior actual depositado por el oleaje.

Los depósitos tipo Altamira (Iturralde-Vinent, 1981) afloran en la mayoría de las playas situadas en ensenadas y puntas que interrumpen la zona pantanosa de manglares en la costa sur. Son arenas doradas, muy distintas a las que normalmente forman otras playas cubanas, que están bien expuestas en una escarpa de erosión en Playa Altamira (x 328.000, y 282.000). (Figura 19).



Fig. 19. Depósitos de arena arcósica dorada (Altamira) en la costa sur de Camagüey. En la barra de tormenta hay conchas y arena biógena calcárea contemporánea. El tronco seco de un Pataván en el agua muestra la magnitud de la erosión y retroceso de la línea costera.

En Playa Altamira la escarpa de 40 cm de alto expone arenas arcosas con dos finas intercalaciones de grava detrítico-conchífera con moluscos recientes. La arena arcósica tiene dispersos fragmentos biógenos en la fracción mayor de 1 mm de grosor, y en general es rica en cuarzo y minerales pesados (ilmenita, epidota, leucóxeno, estaurólita, turmalina, piroxena, anfíbol, clorita, pirita, rutilo, biotita, hidróxidos de hierro). Los depósitos Altamira fueron atribuidos del Pleistoceno tardío al Holoceno temprano, pues infrayace a los depósitos del pantano moderno.

Estas arenas arcósicas están expuestas en costas erosivas de ensenadas y puntas, sometidas a la acción del oleaje, de modo que estos sedimentos subyacentes han quedado expuestos. Por encima se han acumulado y mezclado detritos biógenos recientes (Figuras 19, 20). En consecuencia, las arenas arcosas se consideran sedimentos marino-deltaicos más viejos, acumulados antes de la formación de los pantanos costeros, que en la berma de la playa pueden mezclarse con los sedimentos calcáreos más jóvenes aportados por el oleaje.

La fuente de las arenas arcosas tan peculiares de Camagüey se vincula a la existencia en este territorio de extensos afloramientos de granitoides muy intemperizados, con cortezas de alteración de hasta 15 y más metros de espesor. De hecho, en este territorio se han descrito capas de arenas aluviales del Plio-Pleistoceno, ricas en cuarzo (depósitos tipo Ensenada Grande) (Iturralde-Vinent 1981).

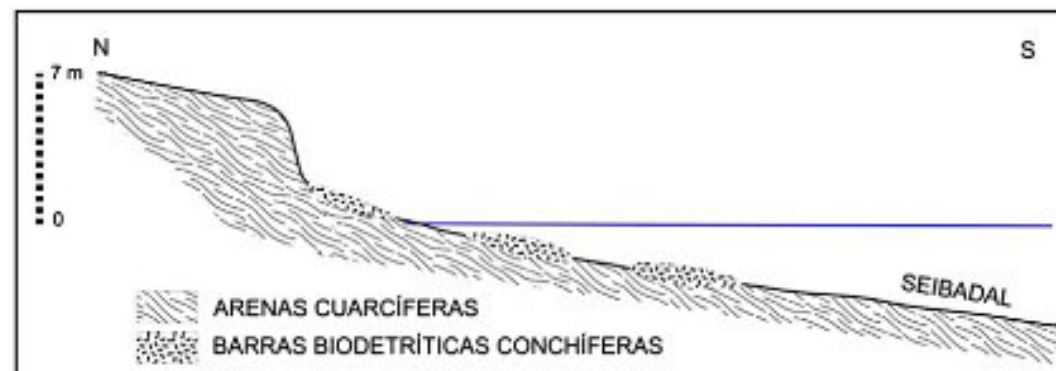


Fig. 20. Perfil de la playa Altamira, en la costa sur de Camagüey.

Los depósitos biógenos areno-gravosos calcáreos, que yacen sobre las arcosas (Figura 20), están representados por un agregado grueso de fragmentos de elementos enteros de equinodermos y moluscos marinos actuales. Estos depósitos de marejadas forman capas que alcanzan dos o tres decenas de centímetros de espesor y de 1 a 3 metros de ancho, los que se presentan en cuatro posiciones dentro del perfil de las playas: 1. Nivel de bajamar generalmente formados por conchas de moluscos arrastrados por la corriente de resaca, 2. Conchas sueltas que mueve el oleaje sobre la berma de la playa, 3. Montículos de 1 metro de ancho en el intervalo hasta donde alcanza la ola normalmente, y 4. Montículos de detrítico conchífero disperso acumulado por las marejadas más allá del nivel de marea alta (playa de tormenta).

Depósito tipo Camacho (Cabrera y Peñalver 2001).

Cabrera y Peñalver (2001) los describen en Cuba central y oriental, como capas consisten de limos areno-arcillosos y arcillas limosas con intercalaciones de gravas finas y *calcrete*, así como cristales dispersos de yeso. Su color es café y grisáceo. Su espesor no sobrepasa los 3 m. Se localizan en Cuba oriental. Yace sobre rocas pre cuaternarias y depósitos aluviales más antiguos. Estos autores les consideran depósitos holocénicos aluviales y de laguna interior.

Depósito tipo Bayamo (Cabrera y Peñalver 2001).

Se distribuyen en la llanura del Cauto, en Cuba sudoriental. Según Cabrera y Peñalver (2001) son arenas grises y amarillo grisáceas de granos finos, con lentes de areniscas y conglomerados de guijarros finos e intercalaciones de arcillas arenosas verde-grisáceas, con manchas grises. Las arenas están a menudo estratificadas. Predominan los granos de metavulcanitas, epidota, rocas silíceas, cuarzo, feldespatos, cloritas, zeolitas, y epidota. Los granos de arenas gruesas están bien redondeados, mientras que los granos más finos son subangulares. Los sedimentos están débilmente unidos por cemento carbonático. La componente carbonática del cemento está representada por calcita y en las arcillas predominan las esmectitas y subordinadamente clorita y probablemente clorita-esmectita interestratificadas. Su espesor oscila entre 30 y 120 m. Son depósitos holocénicos aluviales, deluviales y lagunares.

Depósito tipo Dátil (Cabrera y Peñalver 2001)

Según Cabrera y Peñalver (2001) son lechos de cantos rodados, bloques y guijarros provenientes de silicitas, los cuales predominan en las premontañas. También consiste de arenas arcillosas de composición polimíctica, en forma de intercalaciones y lentes, llegando a predominar en zonas alejadas de las montañas. Todos los depósitos son de coloración abigarrada (rojo, amarillento y gris). El material clástico es poco redondeado y está débilmente cementado. La estratificación es horizontal y se manifiesta principalmente por la alternancia de los horizontes de diferente granulometría. En los niveles poco intemperizados predomina la esmectita, pero puede encontrarse también clorita-esmectita e hidromicas. En la parte superior, más intemperizada, el cemento arcilloso es más homogéneo, de caolinita-esmectita. Alcanza un espesor de 34 m. Forma fajas discontinuas en la ladera de la Sierra Maestra, en Cuba sudoriental. Son depósitos holocénicos aluviales y deluvio-proluviales.

Depósito tipo Jamaica (Cabrera y Peñalver 2001)

Forman una capa de 1,3 m de espesor en las cimas de algunas lomas, en la terraza baja de los ríos y en las depresiones intramontanas, en la región nororiental del país. Según Cabrera y Peñalver (2001) son conglomerados polimícticos de matriz arcilloso-carbonática, con clastos subredondeados mal seleccionados de calizas, metavulcanitas, silicitas y ultramafitas. Pueden contener intercalaciones finas de arenas y limos. El componente arcilloso de la matriz es de esmectita, en menor grado de cloritas e hidromicas. Son depósitos holocénicos de origen aluvial.

Depósito tipo Cauto (Cabrera y Peñalver 2001)

Se localiza en la llanura del Río Cauto, en Cuba oriental. Según Cabrera y Peñalver (2001) son capas de arcillas, limos, arenas, gravas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal e inclinada, de color gris y gris pardusca. Pueden alcanzar 25 m de espesor. Yace sobre Dátil y Bayamo, o sobre rocas pre cuaternarias. Son depósitos aluviales, deluviales y deltaicos holocénicos.

PALEOGEOGRAFÍA

Tomando en cuenta que la duración del Cuaternario se define en unos 1.75 a 1.81 millones de años, y que en Cuba faltan suficientes fechados adecuados de las rocas y depósitos, es difícil elaborar mapas paleogeográficos detallados para el Pleistoceno. Aquí presentarán tres mapas, uno para el Plioceno-Pleistoceno Temprano (~ 1.5-2.0 Ma), otro para el Pleistoceno Superior *sensu lato* (130-120 ka), y otro para el Pleistoceno Superior tardío (25-20 ka). La extensión y conectividad entre los elementos del relieve emergido durante el Plioceno-Cuaternario han estado controladas por dos factores principales: los movimientos del terreno (neotectónica) y las variaciones eustáticas del nivel del mar. Ambos procesos tienen lugar, independientes uno del otro, sobre todo en las áreas alejadas de los casquetes polares, como el Caribe. La combinación de ambos procesos produce, en definitiva, un nivel dado de exposición de los terrenos, cuya extensión es una función del tiempo. Esto se debe a que pueden tener lugar varios escenarios, que en el caso de Cuba se han presentado simultáneamente en distintas costas.

Primer escenario, cuando el nivel del mar desciende por la congelación de las aguas polares, al tiempo que los movimientos neotectónicos tienen carácter ascendente. En consecuencia, las tierras alcanzan su máxima exposición.

Segundo escenario, cuando el nivel del mar asciende por el derretimiento de los hielos polares, al tiempo que los movimientos del terreno son descendentes. En consecuencia, las tierras alcanzan un mínimo de exposición o desaparecen.

Tercer escenario, cuando los movimientos del nivel del mar y de los terrenos son de la misma polaridad, en cuyo caso son limitados los cambios que se observan en el grado de exposición de los terrenos.

Cuarto escenario, cuando los movimientos neotectónicos tienen una polaridad definida durante un largo periodo de tiempo, y las oscilaciones del nivel del mar se reflejan como etapas de aceleración o desaceleración del proceso de transformación de la paleogeografía.

En los márgenes continentales pasivos, que constituyen regiones relativamente estables desde el punto de vista neotectónico, ha sido posible eliminar el efecto de los movimientos del terreno y desarrollar los modelos de las oscilaciones eustáticas del nivel del mar, pero también se han utilizado métodos indirectos, como la determinación de los contenidos de Oxígeno 18 en las conchas de los foraminíferos bentónicos oceánicos (Figura 21).

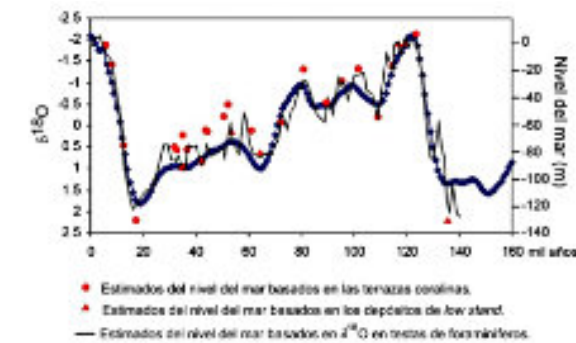


Fig. 21. Gráfico del comportamiento del contenido de Oxígeno¹⁸ vs tiempo (Millones de años) en testas de foraminíferos bentónicos oceánicos, compilado a partir de determinaciones individuales en distintos océanos del mundo, según Karner *et al.* (2002). Los picos positivos representan máximos de clima cálido (deshielos polares) y los picos negativos máximos de clima frío (glaciaciones polares) (Iturralde-Vinent 2003).

En general se considera que existe una relación directa entre el clima, los contenidos de Oxígeno¹⁸ en las conchas de los foraminíferos, y el nivel del mar. Las glaciaciones son etapas de crecimiento de los hielos polares cuando las temperaturas son más frías y bajos los contenidos de Oxígeno¹⁸ en las conchas de los foraminíferos. Entonces ocurren los niveles más bajos del mar y en las zonas tropicales dominan periodos secos (máximo de aridez). Por el contrario, a las etapas de deshielo o interglaciares corresponden temperaturas más cálidas, altos contenidos de Oxígeno¹⁸ en las conchas de los foraminíferos, la elevación del nivel del mar y periodos pluviosos en las zonas tropicales (Figura 21) (Ortega y Zhuravliova, 1983).

En los últimos 850 ka han tenido lugar varios ciclos climáticos glaciales/interglaciares con un periodo aproximado de unos 100 ka y otro menor superpuesto de unos 41 ka (Karner *et al.* 2002). El último máximo glacial tuvo lugar hace unos 20-25 ka, cuando se ha determinado que el nivel del mar descendió a -120 m (Ducloz, 1963; Lambert and Chappell, 2001).

Los cambios del clima durante el Cuaternario en Cuba se han definido como varios ciclos pluviales y secos intercalados, con la peculiaridad de que durante los periodos pluviales las precipitaciones elevan el nivel de base local y determinan la formación de amplias zonas periódicamente inundadas (Mayo 1970; Acevedo 1983; Ortega 1983; Ortega y Zhuravliova 1983; Pajón *et al.* 2001).

Durante las investigaciones sobre la tectónica del Terciario Superior de Cuba, Iturralde-Vinent (1978) identificó la ocurrencia de movimientos oscilatorios del terreno de varias frecuencias simultáneas, del orden de los millones de años, de los miles de años y de los cientos de años. Sin embargo, este autor no tuvo en cuenta las oscilaciones del nivel del mar, de modo que dichos ciclos lo más probable es que sean la resultante de los movimientos eustáticos y neotectónicos

combinados. En este sentido, las investigaciones geodésicas de nivelaciones sucesivas realizadas en décadas pasadas, aunque no se pueden considerar suficientemente precisas dado los estándares actuales de mediciones satelitales, ofrecen una idea de la velocidad de los movimientos del terreno en Cuba. Por este método se han determinado valores extremos de 12-15 *mm/a* en Cuba oriental, y velocidades entre los 1 y 4 *mm/a* para toda Cuba (Liliemberg *et al.* 1973, 1984), como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Velocidades de los movimientos verticales en Cuba determinadas según métodos geodésicos de nivelaciones reiteradas (Liliemberg *et al.* 1984). Note que en Cuba centro-occidental la velocidad máxima alcanza 4 *mm/a*, en tanto que en Cuba oriental llega al valor extremo de 12-15 *mm/a*. Estas cifras sugieren que los terrenos orientales de Cuba tienen una mayor actividad que el resto del territorio, lo cual se explica por su pertenencia a la zona del límite entre las placas de Norteamérica y del Caribe (Iturralde-Vinent 1978, 1998).

Localidad	Velocidad (<i>mm/a</i>)
Sierra de los Órganos	0.5
Alturas La Habana-Matanzas	0.5-0.8
Lomas de Santa Clara	1.0-3.0
Alturas de Minas y Altagracia	0.5-2.0
Llanura sur de Pinar del Río	2.0-4.0
Llanura sur de La Habana	0.5-2.0
Llanura norte de Las Villas	2.0-3.0
Depresión del Cauto	7.0-8.0
Depresión de Santiago de Cuba	1.0-3.0
Sierra Maestra oriental	12.0-15.0
Sierra Maestra occidental	1.0-3.0

Estos valores han sido precisados mediante el fechado de las calizas. En la bahía de Guantánamo, donde solo hay dos terrazas emergidas, Muhs *et al.* (2019) calcularon la tasa de elevación como 0.02-0.11 m/ka para una terraza de ~ 130 ka a ~ 119 ka, que consideraron una tasa baja anómala, ya que en las costas al este y oeste de Guantánamo existen múltiples terrazas marinas, más altas, que podrían registrar una mayor tasa de levantamiento. Al oeste de la Bahía de Matanzas (Schielein *et al.* 2019) las tasas de levantamiento para el MIS 5.5 se calcularon como 0.003 m/ka y 0.036 m/ka, y dentro de la Bahía de Matanzas, estas tasas alcanzan 0.027 m/ka a 0.060 m/ka, ambos por debajo de las tasas de la Bahía de Guantánamo.

En cuanto al nivel del mar, las curvas eustáticas aplicadas en las áreas cercanas a Cuba (Fig. 1), sugieren que hace 7 000 años el nivel del mar estaba situado a unos 7-8 metros por debajo del nivel actual, y hace unos 218 a 220 ka a unos -120 metros por debajo del nivel actual (Figura 1, Lambeck y Chappell 2001). En las zonas tectónicamente activas como Cuba oriental, las oscilaciones eustáticas del nivel del mar ocurren con una frecuencia mayor que los cambios en la polaridad de los movimientos del terreno, por eso el factor principal de la formación del relieve son los movimientos neotectónicos, y las oscilaciones del nivel del mar sólo han modulado la velocidad con que tiene lugar la ampliación o reducción de las tierras emergidas. Este hecho se observa bien en las costeras rocosas aterrazadas de levantamiento sostenido.

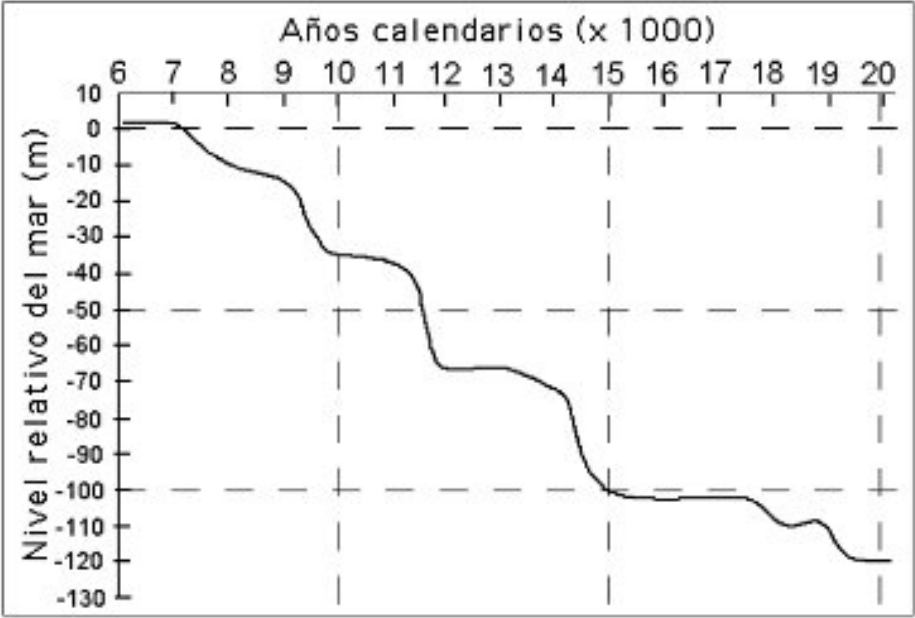


Fig. 22. Gráfico del comportamiento del nivel eustático del mar (según Liu y Milliman 2002).

Observe que los ascensos ocurren sostenidamente desde hace 20 a 25 ka, pero que se intercalan etapas de ascenso rápido (pendiente fuerte) con otras de ascenso lento (pendiente suave). En particular es de destacar la etapa de ascenso lento correspondiente a los últimos 7-8 ka (Transgresión Flandriana, MIS 1, Figura 23), durante la cual la plataforma insular quedó casi delimitada en sus contornos actuales y se formaron la mayoría de los biotopos de aguas someras (Iturralde-Vinent 2003).

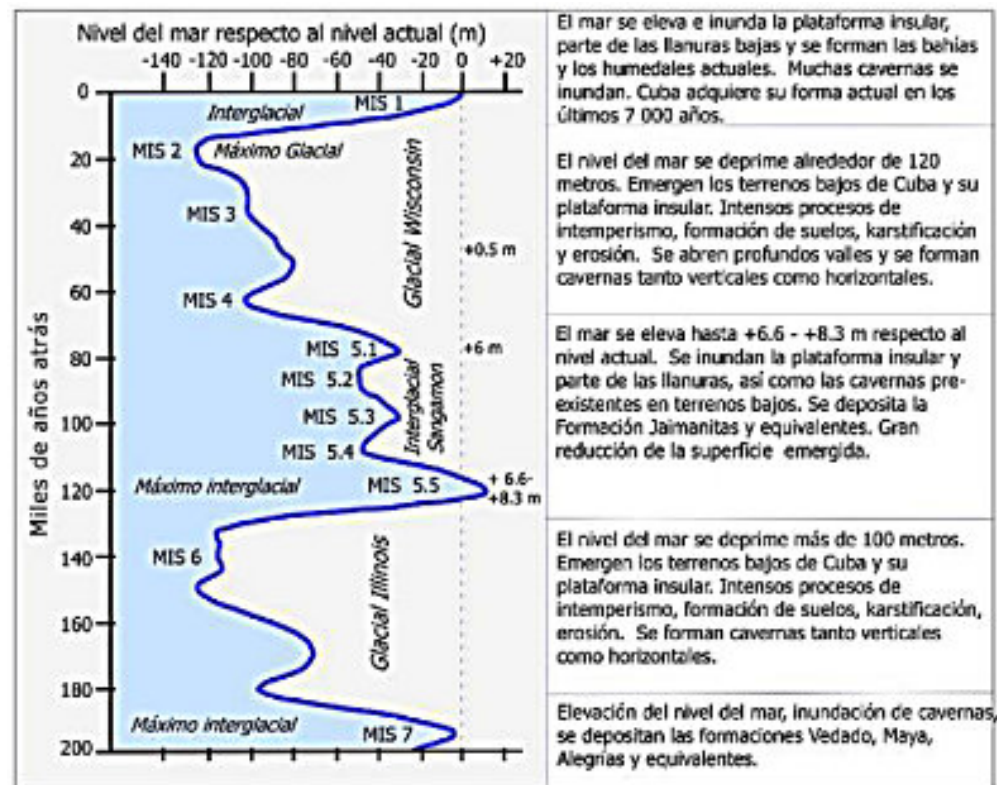


Fig. 23. Oscilaciones del nivel del mar en el Cuaternario superior a consecuencia de las glaciaciones, así como sus consecuencias para Cuba (según Iturralde-Vinent 2020). Cronología adaptada de Chappell (2002).

En contraste, las oscilaciones del nivel de base en el interior de la isla determinan la formación de depósitos, que por lo general son más antiguos a mayor altura, sobre todo en el interior de cavernas transfluentes. Los distintos números de niveles superpuestos de cavernas de este tipo, en dos localidades de la Sierra de Los Órganos (7 en la Sierra de Quemados y 11 en la Sierra de Mesa), son el resultado de la combinación del levantamiento de la sierra, las oscilaciones del nivel de base, y de factores hidrodinámicos y tectónicos locales (Núñez Jiménez y Vilas 2016, Otero et al. 2019, Magaz, Díaz y Hernández Santana 2017). Estos determinaron la acumulación de espeleo-aluvios, y otros en condiciones de lagunas interiores en llanuras y valles intramontanos. En general los aluvios y deluvios cavernarios más antiguos se ha fechado del Plioceno.

TERRAZAS MARINAS

Entre las costas rocosas de Cuba están aquellas que presentan terrazas marinas elevadas, cuyo número y máxima elevación varían de un lugar a otro. Según Liliemberg (1973), la edad de estas terrazas marinas corresponde del Plioceno al Holoceno. Las diferencias en número y elevación entre distintos tramos de costa, son consecuencia del control tectónico, dependiendo de su ubicación dentro de grandes bloques neotectónicos delimitados por fallas activas (Iturralde-Vinent 1978). Por ejemplo, el lado norte de la península de Guanahacabibes es un humedal mientras que la costa sur está levantada (Iturralde-Vinent 1978; 2003). En el norte de Matanzas, la superficie más alta debido a la erosión marina (25 a 51 m) se denominó terraza Rayonera y data del Plioceno

(Ducloz 1963). Estudios recientes de Schielein et al. (2020) en el área de Matanzas, describen marcadores (muescas) durante el MIS 5.5 que van desde 5,5 m sobre el nivel del mar (cresta del arrecife) hasta un máximo de 7 m. Por lo general, la terraza levantada más baja, también la menos deformada, está labrada en la Formación Jaimanitas del Pleistoceno tardío, donde la caliza coralina de esta formación tiene un espesor de 10 a 12 m. En la pared interior de esta terraza, una muesca suele estar bien conservada, de 2 a 7 m sobre el nivel del mar, en diferentes localidades.

Las áreas costeras del sureste de Cuba presentan una situación más compleja, porque dentro del mismo intervalo de tiempo (Plioceno al Holoceno) se formaron de once a catorce terrazas, muchas más que en el oeste y centro de Cuba. El ancho y la elevación de cada superficie cambia lateralmente, por lo que el número de terrazas también cambia. En Cabo Cruz se han distinguido once terrazas. La más alta de estas se encuentra a 240 m y representa una extensa superficie de erosión que se extiende tierra adentro, sustentada por margas de la Formación La Cruz del Mioceno medio a tardío. Debajo hay terrazas (210 a 20 m) construidas sobre caliza coralina y margas de la Formación Maya del Plioceno (Bresznyánszky et al. 1983; Hernández-Santana et al. 1991). En el área de la Bahía de Guantánamo, solo hay dos terrazas elevadas, la más alta entre 39 y 40 m (Muhs et al. 2019). Hacia el este se encuentran muchas más terrazas y en Punta de Maisí se han descrito catorce; donde la más alta de Cuba (460 m) coincide con una superficie erosiva que se extiende tierra adentro, formada en rocas de la Formación La Cruz del Mioceno medio a tardío. Debajo de esto hay varias terrazas marinas donde se desarrollan las formaciones Maya (Plioceno) hasta Jaimanitas (Bresznyánszky et al. 1983; Hernández-Santana et al. 1991). Aquí es interesante subrayar que, en otras zonas de Cuba, las calizas marinas de poca profundidad del Plioceno descansan a no más de 10 m de altura, como en el litoral norte de Mariel a La Habana (Fm. Morro), litoral norte de Matanzas (Fm. Canímar) y la península de Zapata (Fm. Península de Zapata); por lo tanto, el único lugar donde las rocas del Plioceno alcanzan mayores alturas es en el sureste de Cuba (Lámina II; Iturralde-Vinent 1969; 2003).

A lo largo del sector del litoral sureste (con la excepción del litoral que da a la fosa de Bartlett), la terraza más baja está construida sobre la Formación Jaimanitas del Pleistoceno tardío, levantada a 10 y 20 m, y esta formación descansa de manera disconforme sobre rocas más antiguas y se acuña contra la pared de las terrazas más antiguas. En diferentes partes de esta costa de múltiples terrazas, el número de terrazas varía lateralmente, pues algunas se estrechan y desaparecen. Además, la altura del acantilado entre las terrazas adyacentes varía significativamente, posiblemente determinada por el cambio del nivel del mar combinado con el tectonismo local. Estas terrazas están inclinadas y parcialmente colapsadas cuesta abajo, debido a procesos tectónicos activos y los terremotos (Hernández-Santana et al. 1991; Magaz-García 2019). A lo largo de la pared norte de la Trinchera de Caimán, el fondo marino consta de muchas irregularidades (terrazas, crestas, depresiones, etc.) probablemente originadas desde el Plioceno (Calais et al. 1989; Calais y Mercier de Lépinay 1990). En el lado haitiano de la falla transformante (límite de la Placa del Caribe), al menos siete terrazas elevadas se elevan de 200 a 600 m. Tres de ellas están fechadas en 81 ka (16 m), 108 ka (28 m) y 130 ka (52 m) (Dodge et al. 1983).

El número inusualmente grande, la mayor elevación y el nivel de deformación de las terrazas elevadas a lo largo del sureste de Cuba probablemente ocurre en respuesta al levantamiento

tectónico de la cara norte de la Trinchera de Caimán, asociado con el límite de falla transformante activa entre las placas Norteamericana y Caribe. En Guantánamo, Muhs et al. (2019) calcularon la tasa de elevación como 0.02-0.11 m /ka para una terraza de ~ 130 ka a ~ 119 ka, que consideraron una tasa baja. Sin embargo, indicaron que en las costas al este y oeste de la bahía de Guantánamo, existen múltiples terrazas marinas, más altas, que podrían registrar una mayor tasa de levantamiento, lo que implica que la bahía de Guantánamo puede constituir una tasa anómalamente baja. Al oeste de la Bahía de Matanzas (Schielein et al.2019) las tasas de levantamiento para el MIS 5.5 se calcularon como 0.003 m / ka y 0.036 m / ka, y dentro de la Bahía de Matanzas, estas tasas alcanzan 0.027 m/ka a 0.060 m/ka, ambos por debajo de las tasas de la Bahía de Guantánamo. En Haití, utilizando información de las terrazas fechadas en 81 ka y 130 ka, la tasa de elevación se calculó en 0,35 m/ka (Dodge et al. 1983), mucho más alta que en Guantánamo. En cualquier caso, se necesitan más datos antes de que se entienda la causa de las notables elevaciones de las terrazas orientales cubanas.

Por lo tanto, se puede concluir que ninguna de las superficies marinas y terrestres elevadas descritas anteriormente puede explicarse únicamente por los cambios en el nivel del mar, lo que indica que los movimientos tectónicos estuvieron indiscutiblemente involucrados.

En la Tabla 2 se han compilado las alturas y la cantidad de terrazas marinas que se han identificado en el norte de Matanzas (Figura 27), en Cabo Cruz y en la Punta de Maisí. La cantidad de terrazas emergidas medidas en Matanzas (4), en Cabo Cruz (11) y en Maisí (14) son un reflejo claro de la velocidad de los movimientos neotectónicos, pues todas tienen aproximadamente la misma edad.

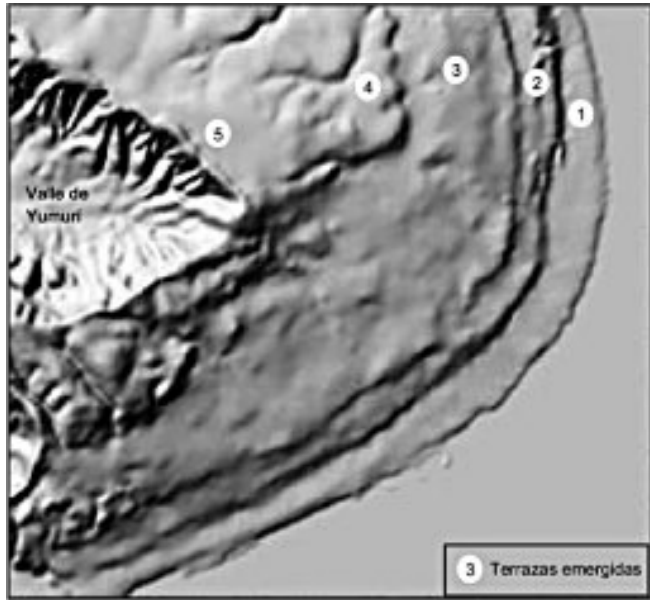


Fig. 27. Mapa digital del terreno de Matanzas, donde se destacan las terrazas emergidas: 1-Seboruco, 2-Puerto, 3-Yucayo, 4-Rayonera, 5-Superficie de nivelación terrestre, probablemente del Plioceno. Mapa cortesía de Idelfonso Díaz.

En la figura 26 se pueden observar los efectos de las variaciones del clima terrestre en los últimos 200 ka, y las consecuencias en términos de transgresiones y regresiones, los cuales modelaron la

formación de las terrazas marinas en combinación con los movimientos del terreno (neotectónica). La terraza más alta de Matanzas alcanza unos 51 metros, y en Maisí hasta 430 m. Si se estima que las terrazas más altas tienen aproximadamente la misma edad, entonces el número de terrazas en Maisí y su altitud son una prueba de que la región oriental de Cuba se ha venido levantando con mayor velocidad durante el Cuaternario (Iturralde-Vinent 1978), ya que el nivel del mar no puede haber cambiado a distinta velocidad en Cuba sudoriental y noroccidental. El número de terrazas emergidas en las costas acantiladas de Cuba generalmente oscila entre 2 y 4, y sus alturas raramente superan los 50 metros, indicando que la velocidad de los movimientos neotectónicos fuera de las zonas montañosas de Cuba oriental ha sido más moderada. Esto se corrobora mediante los datos de las nivelaciones geodésicas reiteradas cuyo valor máximo fuera de Cuba sudoriental es de 4 mm/a (Tabla 1).

Tabla 2. Altitud de algunas terrazas marinas de Cuba.

Terrazas marinas de Matanzas de acuerdo con Ducloz (1963).

TERRAZA	ALTITUD (m)	EDAD
(4) Rayonera	25 a 51	Plioceno (?)
(3) Yucayo	15 a 33	Pleistoceno Inferior
(2) Puerto	~16	Pleistoceno Inferior, Glaciación Illinois
(1) Seboruco	~8	Interglaciación Sangamon
Submarina 1	-1	
Submarina 2	-2 a -6	
Submarina 3	-10 a -17	Wisconsin
Submarina 4	-20 a -55	Wisconsin (-120 m)

Terrazas de Cabo Cruz según Bresznyánszky et al. (1983)

TERRAZA	ALTITUD (m)	SUBSTRATO ROCOSO
XI	260-270	
X	180-240	
VII-XI	170	Calizas Fm. Maya
VI	130-140	Calizas Fm. Maya
V	~	Calizas Fm. Maya
IV	60-70	Calizas Fm. Maya
II-III	~	
I	10-20	Fm. Jaimanitas

Terrazas marinas de Maisí, según Díaz *et al.* (1991)

TERRAZA	ALTITUD (m)	
	Sector 1, Dos Hermanas	Sector 2, Río Seco
XIV	410-430	
XIII	350-380	
XII	260-290	
XI	260-270	180-189
X	230-250	176-178
IX	180-210	157-165
VIII	130-150	143-147
VII	80-100	109-122
VI	40-60	81-86
V		74
IV		48-50
III		40-44
II		15-17
I		0-6

Con respecto a las distintas velocidades y tendencias de los movimientos neotectónicos es importante tener en cuenta la estructura en bloques de Cuba, bloques cuya historia recoge las tendencias seculares de los movimientos del terreno. Iturralde-Vinent (1978, 1998) ha definido la existencia de dos tipos de estos bloques para el periodo de tiempo transcurrido desde el Eoceno Superior (Figura 28).

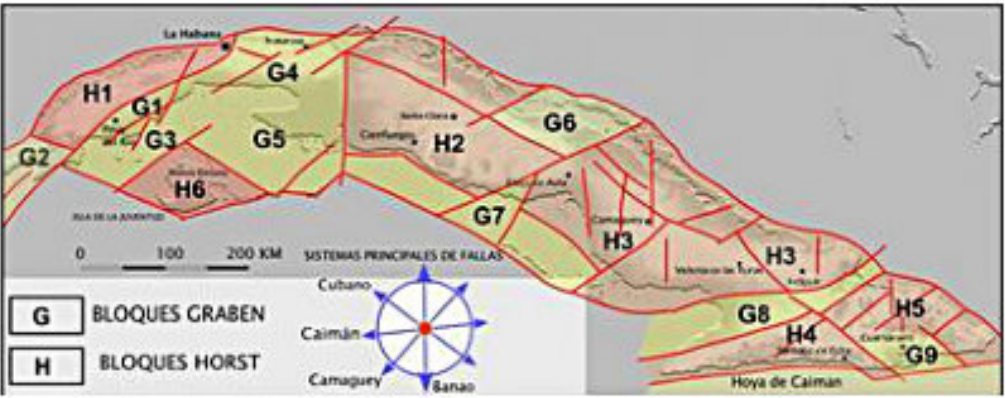


Fig. 28. Mapa de la estructura en bloques de Cuba en el Terciario Superior (bloques neotectónicos), simplificada de Iturralde-Vinent (1978, 1998).

Los bloques hórsticos son aquellos que han mantenido una tendencia al levantamiento desde el Eoceno Superior, en tanto que los bloques grabens han sostenido una tendencia contraria. *Horst*: H1 Guane, H2 Villa Clara, H3 Camagüey, H4 Sierra Maestra, H5 Moa-Baracoa, H6 Isla de la Juventud; *Graben*: G1 San Cristóbal, G2 Guanahacabibes, G3 La Coloma, G4 La Habana-Matanzas, G5 Batabanó, G6 Morón, G7 Jatibonico, G8 Cauto-Nipe, G9 Bayate.

De aquí se reafirma el concepto de que los movimientos del terreno son el factor principal de la formación del relieve actual, ya que la tendencia general del territorio de Cuba ha sido al ascenso e incremento de su área; particularmente desde el Mioceno Superior (Iturralde-Vinent 1978, 1982), lo que es posible sólo si los movimientos neotectónicos dominan a largo plazo sobre las oscilaciones del nivel del mar a la hora de determinar la paleogeografía, como refleja las distintas características de las costas y el número de terrazas emergidas (Figura 29).

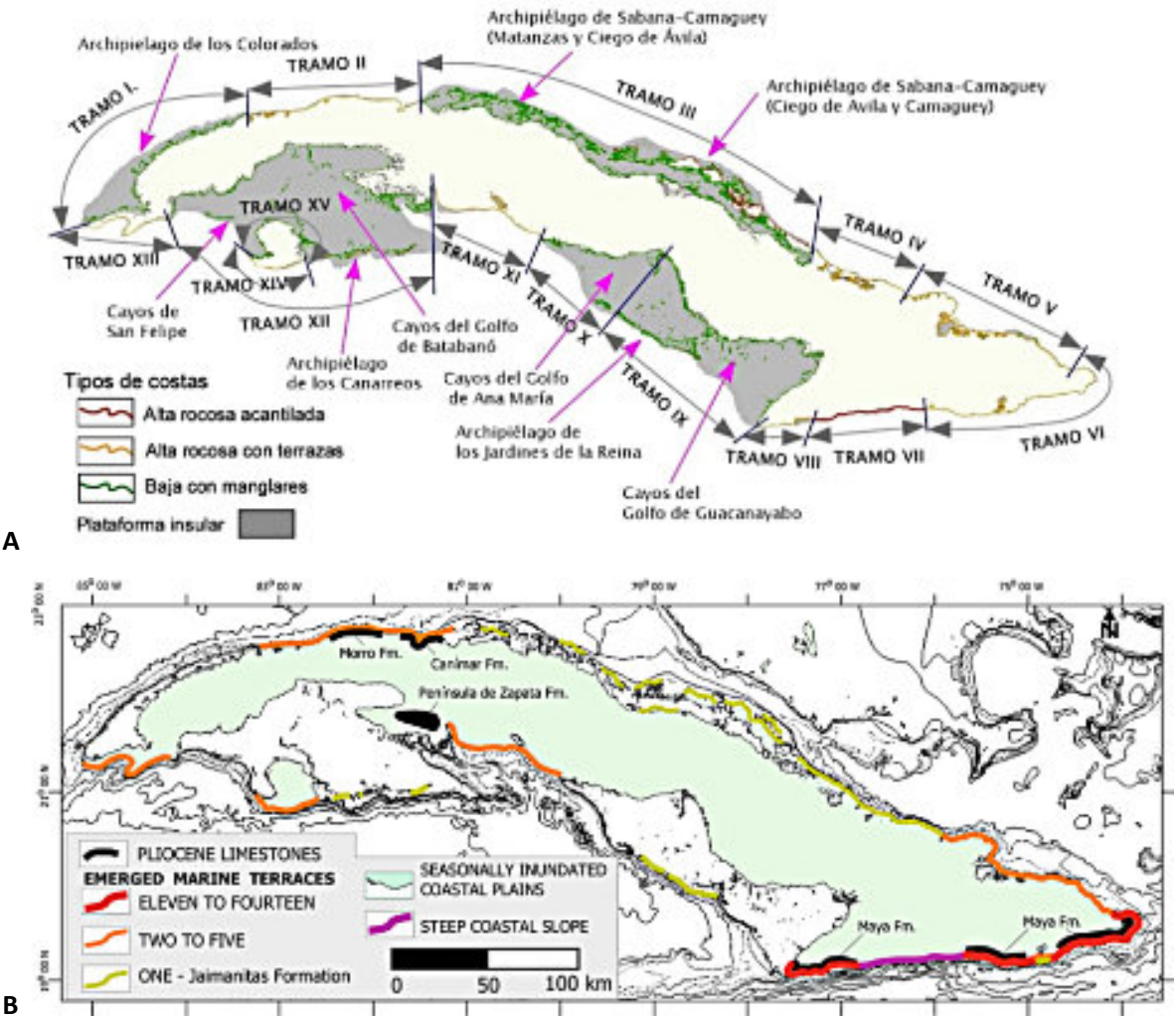


Fig. 29. A. Mapa de los tramos de costa de Cuba, según el relieve litoral (Iturralde-Vinent y Serrano 2016). B. Mapa de las costas de Cuba, con los tramos, donde aflora el Plioceno, aquellos con dos a

cinco terrazas, con dos a catorce, y el talud sin terrazas al sur de Cuba oriental. Tomado de Iturralde-Vinent y Hine 2023.

Para establecer la paleogeografía del Plioceno-Cuaternario de Cuba, tal como se muestra en los mapas subsiguientes, se han combinado los conocimientos adquiridos sobre la estratigrafía, los movimientos neotectónicos, las oscilaciones del nivel del mar, y las huellas que estos procesos han dejado en el terreno. Por ejemplo, la presencia de escarpas de erosión marina, o de depósitos marinos o litorales, son una clara indicación de que el mar ocupó o alcanzó dicho nivel en el momento cuando se formaron esos sedimentos.

El problema radica en que en muchas ocasiones los depósitos Cuaternarios han sido barridos por la erosión, sobre todo las arcillas y arenas, que se han preservado sólo en forma de parches aislados en depresiones estructuras o erosivo-kársticas. A esto último se añade que a menudo no sabemos con exactitud la antigüedad de los depósitos arcillo-arenoso-gravosas de ambientes de llanuras bajas (suelos, depósitos de pendientes, aluvios, sedimentos de lagunas, deltas, pantanos, marismas, eólicos) elevados hasta las partes altas de las llanuras actuales, o presentes en las zonas intensamente karstificadas, donde los ha reducido la erosión. Sin embargo, en las áreas donde están presentes calizas y calcarenitas marinas, más resistentes a la erosión, es posible establecer con más seguridad la presencia del mar en el pasado. A esta categoría corresponden los depósitos costeros y de fondos marinos someros (barras, playas, arrecifes coralinos y depósitos de laguna marina), pero igualmente su edad no la sabemos con precisión sino, aproximadamente.

Al elaborar los mapas paleogeográficos (Fig.30) se seleccionaron los momentos de máxima inundación y de máxima retirada del mar durante el Pleistoceno Superior, ya que entre ambos extremos se desarrolló la paleogeografía de toda la etapa Plioceno-Cuaternaria de formación de la geografía de Cuba actual (Iturralde-Vinent 2003). En estos mapas se distinguen cinco tipos de relieve, de acuerdo a los conceptos básicos descritos por Iturralde-Vinent (1978, 1988) e Iturralde-Vinent y MacPhee (1999); a saber: zonas montañosas, terrenos emergidos relativamente bajos, llanuras periódicamente inundadas, fondos marinos poco profundos, y mares profundos.

Paleogeografía del Plioceno-Pleistoceno Inferior

Esta etapa del desarrollo paleogeográfico de Cuba fue caracterizada previamente por Iturralde-Vinent (1969b; 1978) y Kartashov *et al.* (1981). Sobre la base de estos trabajos se elaboraron los mapas de la figura 29. El primer mapa muestra un escenario correspondiente al tránsito entre el Plioceno y el Pleistoceno, cuando gran parte del territorio insular de Cuba actual estaba emergido. Corresponde con la etapa de máxima exposición de terreno emergido (bajo nivel del mar y máximo ascenso del terreno), entre 3.0 y 2.0 millones de años atrás. Elaborado sobre la base del mapa geomorfológico de Cuba (Biosca *et al.* 1978, Nuevo Atlas Nacional de Cuba, 1989), y los mapas paleogeográficos del Plioceno (Iturralde-Vinent, 1969b, 2003; Kartashov *et al.* 1981).

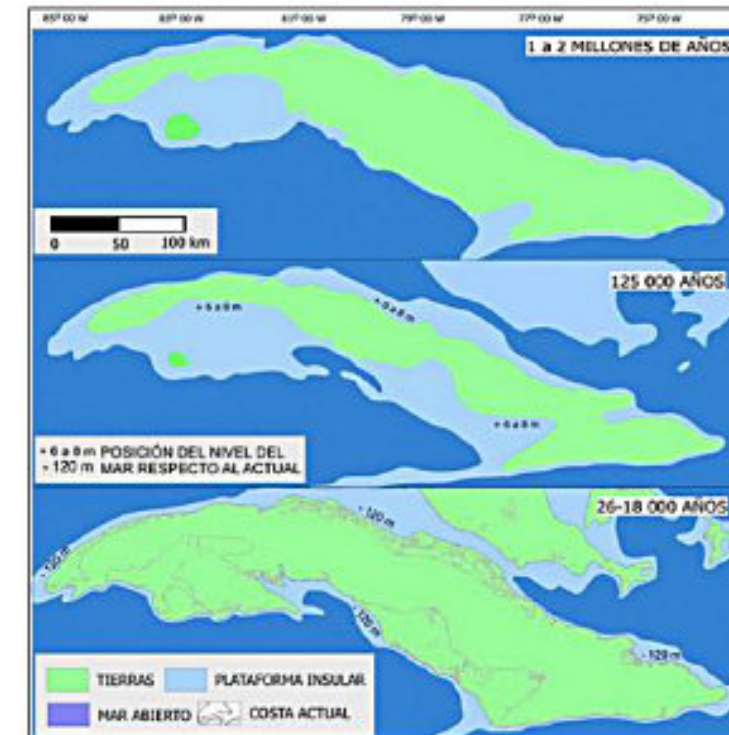


Fig. 30. Mapas paleogeográficos del Plioceno-Pleistoceno.

Las rocas del Plioceno-Pleistoceno Inferior están definidas tanto por su posición estratigráfica como por su contenido fosilífero, y para confeccionar este mapa se tomaron como base las formaciones Punta del Este, Morro, El Abra, Península de Zapata, Maya, Bayamo y otras no formalizadas (Albear e Iturralde-Vinent, 1985; Brönnimann y Rigassi, 1963; Ducloz, 1963; Franco, 1983a, 1983b; Franco y De la Torre, 1982; Iturralde-Vinent 1969a; 1969b; Iturralde-Vinent y Morales, 1973; Iturralde-Vinent y Cabrera 1998; Kartashov *et al.* 1981; Peñalver *et al.* 1997; 1998 Pushcharovskiy *et al.* 1988). También se utilizaron las edades de las superficies de abrasión marina y erosión subaérea (Ducloz 1963; Acevedo 1981; Atlas Nacional de Cuba 1989) y de las cortezas de intemperismo (Buguelsky 1979).

Paleogeografía del Pleistoceno Superior (sensu lato)

Este mapa (Figura 29) representa la paleogeografía de Cuba en un momento de máxima inundación posible durante el Pleistoceno Superior *sensu lato*, correspondiente a la sedimentación de la Formación Jaimanitas y los depósitos isócronos, con una antigüedad alrededor de 130-120 ka atrás. Fue elaborado sobre la base del mapa geomorfológico de Cuba (Biosca *et al.* 1978; Nuevo Atlas Nacional de Cuba 1989), los mapas y datos de Ionin *et al.* (1977) e Iturralde-Vinent (2003).

Las rocas marinas que se han referido a la Formación Jaimanitas han sido fechadas por métodos de edad absoluta en unos 131 mil años (Peñalver *et al.* 1983a). Generalmente se refieren a esta formación las biolititas coralinas, biocalcaremitas y calizas asociadas, de ambiente de plataforma carbonatada, con fósiles de aspecto muy moderno, en las cuales las conchas de aragonito están bien preservadas (Albear Franquiz e Iturralde-Vinent 1985; Bresznyánszky *et al.* 1983, Brönnimann y Rigassi 1963; Franco 1983a, 1983b; Iturralde-Vinent y Cabrera 1998; Kartashov *et al.* 1981;

Pushcharovskyi *et al.* 1988; Peñalver *et al.* 1997, 1998; etc.). La Formación Jaimanitas constituye las terrazas bajas situadas hasta 8-10 metros sobre el nivel del mar en Cuba occidental y central, y quizás hasta 20 metros en Cuba sudoriental (Tabla 2; Bresznyánszky *et al.* 1983).



Fig. 31. Costa elevada donde están expuestas la terraza baja "Seboruco" (Fm. Jaimanitas) y la segunda terraza "Puerto" (Fm. Vedado) según la nomenclatura de Ducloz (1963). Parte de la terraza Puerto ha sido arrancada por la abrasión marina dejando como relicto varios peñones y pequeños promontorios. Farallones de La Jíjira, Provincia Mayabeque.

En el mapa del Pleistoceno Superior los terrenos emergidos se han delimitado tomando en consideración que en las áreas montañosas y premontañosas actuales, en todo el país, se observan huellas claras de levantamiento prolongado (erosión profunda, redes de drenaje radiales, aluvios colgados, intenso desarrollo del karst, cavernas con caídas verticales muy profundas, cavernas aluviales con varios niveles superpuestos, etc.). Estas áreas han sido definidas como de origen subaéreo en el mapa geomorfológico de Cuba (Biosca *et al.* 1975; Nuevo Atlas Nacional de Cuba 1989). Es posible que en el Pleistoceno Superior la altitud promedio de las zonas montañosas de Cuba haya sido menor que la actual, cuyos valores son $<2\ 000\ m$, pues los depósitos de talud de grano muy grueso, como los del sur de la Sierra Maestra (Franco 1983b), son muy limitados en otras partes del país.

Las llanuras periódicamente inundadas se han definido como superficies de denudación en los mapas geomorfológicos modernos (Atlas Nacional de Cuba 1989). Aquí se categorizan como periódicamente inundadas sobre la base del amplio desarrollo de sedimentos arcillo-arenoso-gravosos que infrayacen los suelos rojos en la mayoría de las llanuras cubanas emergidas (Kartashov *et al.* 1981; Peñalver *et al.* 1997, 1998). Estos sedimentos han sido designados como de origen marino por Kartashov *et al.* (1981). Pero Dzulynski *et al.* (1984) señalaron con toda propiedad que este tipo de materiales se acumuló sobre las superficies llanas de denudación situadas a poca altura sobre el nivel del mar, probablemente en ciénagas, lagunas y terrazas de ríos.

Las áreas cenagosas situadas cerca del nivel del mar estaban atravesadas en algunos lugares por canales de arroyos de poca profundidad, con crecidas temporales. Las observaciones de Mayo (1970), Acevedo (1983) y Ortega y Zhuravliova (1983) en Cuba occidental, y las del autor en casi todas las llanuras cubanas, confirman este punto de vista, con la particularidad de que eventualmente se desarrollan también sedimentos de tipo lacustre (Acevedo 1983).

Las llanuras inundadas constituyeron probablemente filtros y/o barreras periódicas que obstaculizaron la migración de muchos elementos de la biota terrestre, los que debieron concentrarse en las zonas elevadas (islas), provocando quizás algunas extinciones locales o totales.

Los fondos marinos poco profundos coincidían con la plataforma insular antigua. Aquí se estima, siguiendo a la mayoría de los autores, que las calizas que constituyen el subtrato de la plataforma insular actual y los cayos pertenecen a la Formación Jaimanitas por cuatro razones: 1) contienen una fauna marina moderna, 2) las conchas aragoníticas no están disueltas, 3) representan las mismas facies, 4) ocupan la misma posición estratigráfica (Notas de campo del autor y mapa geológico de Cuba, Pushcharovskyi 1988). Estas mismas rocas forman las terrazas bajas (terrazza de Seboruco según Ducloz 1963) que limita las costas acantiladas de Cuba (Tabla 2; Mapa Geomorfológico del Nuevo Atlas Nacional de Cuba 1989). Generalmente estas calizas y calcarenitas tienen muy pequeño contenido de material terrígeno, con excepción de los depósitos al sur del Escambray y en algunas localidades al sur de Cuba oriental (Franco 1983b). Este hecho reafirma el concepto de que el relieve de las zonas emergidas en aquella época no era muy vigoroso, a excepción del flanco sur de la Sierra Maestra y del Escambray.

Paleogeografía del Pleistoceno Superior tardío

Este mapa (Figura 30) tiene como objetivo mostrar la paleogeografía del territorio en una etapa de máxima extensión del terreno emergido, tomando como referencia el fuerte descenso del nivel del mar que tuvo lugar hace 20-25 ka, cuando dicho nivel estaba situado a unos -120 metros por debajo del nivel actual. Elaborado sobre la base del mapa geomorfológico de Cuba (Biosca *et al.* 1978; Nuevo Atlas Nacional de Cuba 1989), los datos y mapas de Ionin *et al.* (1977), y notas de campo del autor. Durante esta etapa toda la plataforma insular actual y una parte del talud insular estaban expuestos a la intemperie. Esto implica que todos los arrecifes coralinos cubanos actuales (y posiblemente Antillanos) tienen menos de 20-25 ka, lo cual se debe controlar en el futuro. En aquella época Cuba habría alcanzado una superficie expuesta superior a los 180 000 km², que se obtiene sumando las áreas de la plataforma sumergida y las zonas emergidas actuales (Iturralde-Vinent 1988). Este descenso dejó sus huellas en el relieve, pues se desarrolló y profundizó la erosión-denudación cárstica y se formaron potentes cortezas de intemperismo, representadas por *terra rosa* y otros productos. No se conocen en Cuba sedimentos marinos bien fechados de esta edad, pero algunos de los sistemas de dunas fósiles que se observan a lo largo de los cayos que rodean la isla, pudieran presentar esta antigüedad (Shantzer *et al.* 1976; Iturralde-Vinent y Cabrera 1998).

En las llanuras meridionales de Cuba hay abundante desarrollo de karstificación superficial y suelos potentes, testigos de una disección relativamente profunda del relieve (Biosca *et al.* 1978; Nuevo Atlas Nacional de Cuba 1989), al igual que en las zonas montañosas (Acevedo 1981).

Asimismo, las investigaciones para la construcción de algunos embalses en el Río Zaza (Sancti Spiritus) y El Mango (Pinar del Río), revelaron la presencia de antiguos cauces insertos en la llanura, hoy rellenos por sedimentos aluviales más jóvenes. De acuerdo a las observaciones de Skwaletski e Iturralde-Vinent (1971), las calizas de la llanura sur de La Habana y Matanzas tienen una karstificación intensa hasta la profundidad de -100 metros, y más abajo estas rocas son más compactas. En las áreas litorales y de la plataforma cubana y de los territorios cercanos, se han descrito dolinas, cenotes y hoyos azules que tienen su fondo a la profundidad de -198m (Bahamas), -146 m (Florida), -130 m (Yucatán) y -85 m (Cuba). Todo esto sugiere una disección profunda, que probablemente coincidió con el descenso del nivel del mar hasta -120 m.

En las zonas inundadas que hoy ocupa la plataforma insular del sur de Cuba y el norte de Guanahacabibes, las investigaciones de Ionin *et al.* (1977) revelaron la existencia de una superficie de calizas karstificadas cubierta directamente por suelos rojos, y estos, por sedimentos marinos del Holoceno. Pequeños parches de sedimentos rojos carbonatizados también se observan en depresiones sobre la superficie de la terraza abrasiva labrada en la Formación Jaimanitas, en muchas localidades de las costas norte y sur de Cuba (Notas de campo del autor; Bresznyánszky *et al.* 1983), los que pueden ser considerados como los restos erosivos de las capas de arcillas rojas que cubren las calizas en la plataforma insular. Esto sugiere que la plataforma insular estuvo emergida después de la sedimentación de Jaimanitas, en el periodo de tiempo en consideración. Núñez Jiménez en Furrázola-Bermúdez *et al.* (1964) señala que en la plataforma insular se observan muchos antiguos cauces de ríos hoy sumergidos, bocas de cavernas y sugieren que la mayoría de las actuales bahías cubanas en el pasado fueron valles fluviales que se inundaron en el Holoceno.

En otras palabras, hay abundantes indicios que apoyan la ocurrencia de un descenso importante del nivel del mar a nivel regional en el Caribe occidental, aunque no está definido si todos estos indicios corresponden al evento de 20-25 ka atrás o abarcan un tiempo mayor, o son el resultado de la combinación de todos los eventos de descenso relativo del nivel del mar ocurridos durante la segunda mitad del Pleistoceno.

Holoceno

Tomando en cuenta los conceptos expuestos en el inciso anterior se puede llegar a la conclusión de que el relieve actual de Cuba, y el trazado de su línea costera, es un evento muy joven, pues tiene menos de 20-25 ka y continúa modificándose. En este marco de tiempo, y en particular durante los últimos 8 ka (Holoceno), el ascenso del nivel del mar tiene que haber determinado que la línea de la costa haya retrocedido. Esto queda evidenciado en muchos lugares, pero hay excepciones donde este proceso ha estado fuertemente contrarrestado por los movimientos de ascenso del terreno.

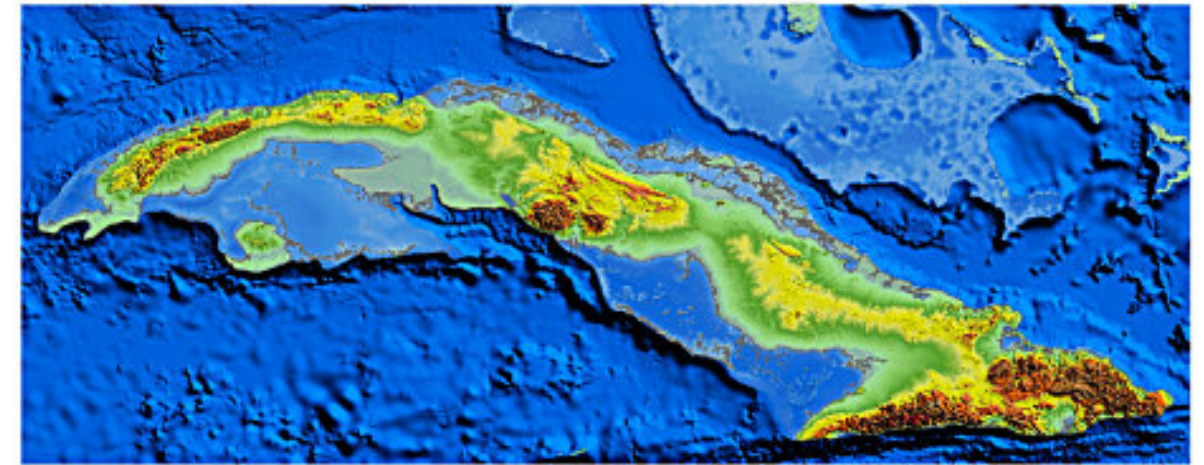


Fig. 31. Mapa del relieve actual resultado de los procesos tectónicos y de erosión-sedimentación.

Durante todo el Holoceno, sin embargo, el movimiento de ascenso del nivel del mar no fue homogéneo, sino que tuvo etapas de aceleración periódica y etapas de “estabilidad” cuando el mar se mantuvo aproximadamente a la misma altura durante varios miles de años (Liu and Milliman, 2002). Esta elevación histórica del nivel del mar y consecuente inundación de las costas bajas se ha acelerado desde hace unos 150 años, debido al calentamiento global que derrite los hielos y nieves polares, la expansión térmica de los océanos y otros factores. Este es un proceso muy joven vinculado al cambio climático, que se empieza a manifestar, sobre todo, en las costas bajas, donde se han incrementado los procesos de erosión de las playas y está ocurriendo la destrucción de los bosques de mangle y afectaciones a los humedales (Iturralde-Vinent y Serrano 2016).

El avance de la línea de costa tierra adentro se observa bien al sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque, donde caminos y cercados se prolongan bajo el mar. También en la costa sur de algunos cayos del archipiélago de los Canarreos (Cayo Largo del Sur), la erosión marina producto del ascenso del nivel del mar está destruyendo las paleodunas costeras y provocando la recesión de la antigua línea de playa.

Al sur de Camagüey este proceso de modificación de la línea de costa está acompañado de la destrucción de los manglares, que en muchos casos han dado lugar a la formación de ensenadas con playas de arena cuarzosa dorada (Depósitos tipo Altamira), donde estos depósitos aluvio-marinos han quedado expuestos a la superficie (Punta Macurije, Playa Florida, etc.). En estos tramos de costa las fajas de mangle verde o de mangle prieto están en contacto directo con la costa, faltando la faja de mangle rojo. Este proceso ha dado lugar también a la erosión de algunos cayos arenosos en el archipiélago de Jardines de la Reina, de modo que la vegetación de esos cayos ha quedado reducida a pocos troncos de mangle verde parcialmente sumergidos en el mar.

Sin embargo, en algunas fajas litorales se observa el proceso contrario de desecación y levantamiento de la zona costera. En algunos cayos de la costa norte de Camagüey, la superficie de abrasión marina situada a menos de un metro sobre el nivel del mar, forma una superficie abrasiva muy joven labrada en las calizas de la Formación Jaimanitas (Pleistoceno Superior); y está

desprovista de vegetación, quedando sólo los troncos y raíces de mangle seco. Esto es muy también común en las costas acantiladas de Cuba, donde la superficie abrasiva sobre la Formación Jaimanitas está a unos pocos metros sobre el nivel del mar. Este es el resultado de los movimientos de ascenso del terreno que sobrepasan la velocidad de ascenso del nivel del mar y dan lugar al levantamiento de las áreas costeras.

La permanencia de este proceso se puede precisar es la península de Zapata, donde la misma superficie abrasiva sobre Jaimanitas está cubierta por turbas cuya mayor antigüedad, según determinaciones por el método de C_{14} , es de 18 ka (Ducloz 1963), indicando que está inundada (pero casi al nivel del mar) desde antes del Holoceno.

En otras zonas, como en el archipiélago de Los Canarreos, donde por el sur ocurre el levantamiento relativo del nivel del mar, por el norte de Cayo Largo del Sur y en Cayo Piedra, hay claras evidencias del levantamiento del terreno. En este último cayo la superficie de Jaimanitas está a 0.40-0.50 metros sobre el nivel medio del mar y hay un nicho de oleaje/mareal labrado en calcarenitas eólicas post-Jaimanitas, situado a 1.7 metros sobre el nivel del mar (Notas de campo del autor). Esto indica que Los Canarreos se están comportando como un pequeño bloque tectónico cuyo flanco norte se levanta mientras su flanco sur se hunde, en un claro proceso de basculación. Tal proceso de basculación de bloques se observa también a mayor escala. Por ejemplo, la costa norte de La Habana (donde hay elevaciones de hasta 100 metros) se levanta en tanto que la costa sur (donde el relieve es llano), se hunde. Lo mismo se observa en la provincia de Camagüey. No es este el caso de Cuba Oriental, pues en dicha región ambas zonas costeras están en proceso de levantamiento (Iturralde-Vinent 1978, 1982, 1998).

Un ejemplo muy local donde ocurren levantamientos del terreno, es el archipiélago de Jardines de la Reina (sur de Camagüey), donde los cayos de Orihuela conforman una cresta coralina, que tiene un extremo bajo el mar y hacia el otro este por el rumbo, está emergida desde tiempos recientes (Notas de campo del autor).

Al norte de Matanzas, en el poblado de Martí, se encuentra un depósito de brea fosilífera que contiene restos de animales terrestres que se han fechado, entre 5 ka y 9 ka, por el método de C_{14} , los cuales están mezclados con moluscos marinos, probablemente de la misma edad (Iturralde-Vinent *et al.* 2000 y datos inéditos). Este depósito hoy yace a unos 20 metros sobre el nivel del mar, sugiriendo la ocurrencia de un levantamiento del terreno (retirada local del mar) en el Holoceno. Estas observaciones confirman que los movimientos del nivel del mar generalmente son superados por los movimientos del terreno en las áreas de levantamiento neotectónico activo.

Tomando en cuenta estas observaciones se puede sugerir que hace 7-8 ka el mar que cubría parte de las zonas costeras se elevó, con distintas magnitudes localmente, en todo el territorio. A esto se añadió un pico de pluviosidad que contribuyó al empantanamiento de las partes bajas del relieve. Así se deben haber desarrollado ambientes de humedales y lagunas en las llanuras, donde cocodrilos, tortugas y otros animales acuáticos convivieron con animales terrestres en casi todo el territorio de Cuba (Mayo 1970; Acevedo y Arredondo 1982; Acevedo 1983). Posteriormente, la poca velocidad de ascenso del nivel del mar desde hace 7 000 a, permitió que el ascenso del nivel del terreno, en muchas localidades, y sobre todo en las áreas con tendencia secular al

levantamiento, sobrepasara la velocidad de ascenso del nivel del mar y así se moldeara el relieve de actual del archipiélago. De este modo se puede llegar a la conclusión de que el relieve de Cuba, y en particular el contorno de sus costas, es muy joven, con apenas 7 000 a.

REFERENCIAS

Estas y otras referencias pueden consultarse en la Biblioteca Digital Cubana de Geociencias (www.redciencia.cu/geobiblio/incio.html).

Acevedo, M. 1981. *Geografía Física de Cuba*. Pueblo y Educación, Tomo 1., 313 p.

Acevedo, M. 1983. Observaciones sobre hipótesis recientemente anunciadas acerca del Plioceno y Pleistoceno de Cuba occidental. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 7:37-56.

Acevedo, M. y O. Arredondo 1982. Paleogeografía y geología del Cuaternario de Cuba. Resúmenes *IX Jornada Científica del Instituto de Geología y Paleontología*, p. 59-84.

Acevedo, M., R. Gutiérrez 1974. Contribución al estudio de la estratigrafía del Cuaternario de Cuba del occidente de Cuba. *Voluntad Hidráulica* II (29):59-62.

Albear Franquiz, J.F. de, Iturralde-Vinent, M. 1985. Estratigrafía de las provincias de La Habana, en M. Iturralde-Vinent (ed.) Contribución a la geología de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana, *Editorial Científico-Técnica*, p. 12-54.

Authemayou, C., Nuñez, A., Pedoja, K., Peñalver, L., Chauveau, D., Dunán-Avila, P., Martín-Izquierdo, D., de Gelder, G., Husson, L., Castellanos Abella, E., Benítez Frometa, P., Pastier, A-M., 2023. Oblique collision of the Bahamas Platform at the northern boundary of the Caribbean plate recorded by the Late Cenozoic coastal terraces of SE Cuba. *Tectonics*. <https://doi.org/10.1029/2023TC007806>.

Authemayou, C., L. Peñalver, D. Chauveau, et al., 2025. Quaternary uplift on the southeastern coast of Cuba, *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2025.230789>

Biosca, L., R. De la Cruz, P. Cañas Abril, S. Isalgué 1978. Geomorfología, mapas 30-31, en *Atlas de Cuba*, Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.

Bresznyánszky, K., G. Franco, Gy. Radocz. 1983. Perfiles comparativos de las áreas de Cabo Cruz y Maisí, en E. Nagy (ed.) *Contribución a la geología de Cuba oriental*. Editorial Científico-Técnica, p 169-172

Brönnimann, P. y Rigassi, D. 1963. Contribution to the geology and paleontology of the area of the city of La Habana, Cuba, and its surroundings. *Eclog. Geol. Helvetiae* 56 (1): 193-480.

Bugelsky, Yu. 1979. *Cortezas de intemperismo mineralizadas del Trópico húmedo* (en ruso). Editorial Nauka, Moscú, 286 p.

Busto, R. Del. 1975. Las terrazas marinas de Maisí. Univ. de La Habana, Ciencias, *Serie 7 Geografía*, p. 1-12.

Chappell, J. 2002. Sea level changes forced ice breakouts in the Last Glacial cycle: new results from coral terraces. *Quaternary Science Reviews* 21; 1229–1240.

Cherniajovski, A.G., y Peñalver, L., 1977. Caracterización de la litogénesis en las condiciones de clima tropical (En el ejemplo de los depósitos cuaternarios de Cuba) (en ruso). *Litología y Recursos Minerales*, 5: 58-75.

Díaz, J.L., A. Magas, J. Hernández, A. Venero, F. Pérez 1991. Reconstrucción tectónica local mediante el análisis de la morfoescultura marina en la franja costera Río Seco-Punta Maisí, provincia de Guantánamo, Cuba. pp. 10-19. *En Morfotectónica de Cuba* oriental. Editorial Academia, La Habana.

Ducloz, C. 1963. Etude Geomorfologique de la région de Matanzas, Cuba. *Archives de Sciences*, v. 16 (2):351-402.

Dzulynski, S., A. Pszczółkowski, J. Rudnicki 1984. Observaciones sobre la génesis de algunos sedimentos terrígenos cuaternarios del occidente de Cuba. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio*, v. 9:75-90.

Franco, G.F. 1983a. Columna geológica del Terciario en el Golfo de Guacanayabo, en E. Nagy (ed.) Contribución a la geología de Cuba oriental. *Editorial Científico-Técnica*, p 127-133

Franco, G.F. 1983b. Observaciones sobre el Neógeno-Cuaternario de la franja marina costera del extremo oriental de Cuba, en E. Nagy (ed.) Contribución a la geología de Cuba oriental. *Editorial Científico-Técnica*, p 144-162.

Franco, G.F., A. De La Torre 1980. Los depósitos costeros del sur de la isla de la Juventud (Isla de Pinos), Cuba. *Rev. Ciencias Tierra y del Espacio* (2):1-12.

Furrazola-Bermúdez, G., C.M. Judoley, M.S. Mijailóvskaya, I.P. Novoastky, A. Núñez Jiménez, J.B. Solsona. 1964. *Geología de Cuba*. Editorial Nacional de Cuba, 239.

Graham, R., *et al.* (FAUNMAP Working Group). 1996. Spatial response of mammals to Late Quaternary environmental fluctuations. *Science* v. 272:1601-1606.

Hearty, P.J. y A. Conrad Newman, 2001. Rapid sea level and climate change at the close of the Last Interglaciation (MIS 5e): evidence from the Bahama Island. *Quaternary Science Review* 20: 1881-1895.

Hedges, S.B. 1996. The origin of the West Indian amphibian and reptiles. in R. Powell and R.W. Henderson (eds.), *Contribution to west Indian Herpetology: A tribute to Albert Schwartz*. Society for the Study of Amphibians and reptiles, Ithaca (New York). Contributions to Herpetology 12, 95-128.

Ionin, A.S., A. Pavlidis, O. Avello Suárez 1977. *Geología de la plataforma de Cuba* [en ruso]. Editorial Nauka, Moscú, 215 p.

Iturralde-Vinent, M. 1967. Estudio geológico preliminar del municipio de Manguito, provincia de Matanzas, Cuba. Inst. Nac. Recursos Hidráulicos, *Publicación Especial* (4):1-12.

Iturralde-Vinent, M. 1969a. El Neógeno en la provincia de Matanzas, Parte General. Instituto Nacional Recursos Hidráulicos, Dept. Ingeniería Geológica, *Publicación Especial* (7):3-30.

Iturralde-Vinent, M. 1969b. Principal characteristics of the Cuban Neogene stratigraphy. *AAPG Bull.* 53:1938-1955.

Iturralde-Vinent, M. 1978. Los movimientos tectónicos de la etapa de desarrollo platáformico de Cuba. Acad. Ciencias de Cuba, *Informes Científico-Técnicos* 20:3-24.

Iturralde-Vinent, M. 1981. *Estratigrafía del Cuaternario de Ciego, Camagüey y Las Tunas*. En Iturralde-Vinent, M., D. Tchounev y R. Cabrera 1981. Geología de Camagüey. Oficina Nacional de Minerales (inédito).

Iturralde-Vinent, M. 1982. Aspectos geológicos de la biogeografía de Cuba. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio*, v. 5: 85-100.

Iturralde-Vinent, M. 1988. *Naturaleza geológica de Cuba*. Editorial Científico-Técnica, 146 p.

Iturralde-Vinent, M. 1991. Deslizamientos y descensos del terreno en el flanco meridional de la Sierra Maestra, Cuba sudoriental: In *Morfotectónica de Cuba Oriental*, Inst. de Geografía, ACC, p. 24-27.

Iturralde-Vinent, M. 1998. Sinopsis de la constitución geológica de Cuba. pp. 9-56. En J.C. Melgarejo y J.A. Proenza, Geología y Metalogénia de Cuba: Una introducción. *Acta Geológica Hispánica* v. 33, no. 1-4.

Iturralde-Vinent, M.A. 2020. Ensayo sobre karst enterrado y sumergido en la plataforma insular Cuba. *CubaGeográfica*

Iturralde-Vinent, M.A (Editor) 2021. *Compendio De Geología De Cuba*. Editorial Citmatel. ISBN 978-959-237-352-5.

Iturralde-Vinent, M.A., 2022. Comentarios a raíz de la publicación titulada: "Aumento del nivel del mar y protección de las costas". *CubaGeografica*. 3 p.

Iturralde-Vinent, M. y M. Cabrera Castellanos. 1998. Estratigrafía del Cuaternario de los cayos del norte de Camagüey. *Geología y Minería'98, Memorias*, Tomo I, Sociedad Cubana de Geología, p. 319-321.

Iturralde-Vinent, M., R.D.E. MacPhee, S. Díaz-Franco, R. Rojas-Consuegra, W. Suárez, A. Lomba. 2000. Las Breas de San Felipe, a Quaternary Fossiliferous Asphalt Seep near Martí (Matanzas Province, Cuba). *Caribbean Journal of Science* 36(3-4):300-313.

Iturralde-Vinent, M., Morales, J.L. 1973. Contribución al estudio del Mioceno Superior y Plioceno al norte de Matanzas. *Rev Tecnológica* XI (5-6): 24-31.

Iturralde-Vinent, M. and Hine, A.C. 2023. The Cuban marine terraces and coral communities: Response to sea level changes and tectonic movements. Chapter IV, in: V.N. Zlatarski et al. (eds.). *Coral Reefs of Cuba, Coral Reefs of the World* 18, https://doi.org/10.1007/978-3-031-36719-9_4.

Iturralde-Vinent, M.A., Serrano Méndez, H. (eds.) 2016. *Peligros y vulnerabilidades de la zona marino-costera de Cuba: Estado actual y perspectivas ante el cambio climático hasta el 2100*. Editorial Academia, La Habana. 72 p

Karner, D.B., J. Levine, B. Medeiros, R. A. Muller, 2002. The Benthic stack. A new stacked record of global climate of the last 850,000 years. "<http://jlevine.lbl.gov/BenStackintro.html>"

Kartashov, I.P., N.A. Mayo, A.G. Cherniakhovsky, L.L. Peñalver 1976. Descripción de algunas formaciones geológicas del sistema Cuaternario de Cuba, reconocidas recientemente. Acad. Ciencias Cuba, *Serie Geológica* (26): 1-12.

Kartashov, I.P., A.G. Cherniakhovsky, L.L. Peñalver 1981. Antropogene of Cuba. (En ruso) *Transaction Geological Institute* v. 356, pp. 1-145. Editorial Nauka, Moscow.

Lambeck, K., J. Chappell, 2001. Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle. *Science* v. 292: 679-686.

Liliemberg, D. 1984. Geodinámica contemporánea del sistema montañoso Sierra Maestra, pp. 128-135, En. *Polígonos Geodinámicos Complejos*, Editorial Nauka, Moscú.

Liliemberg, A., 1973. Algunos problemas de la formación del archipiélago cubano. Academia de Ciencias de Cuba, *Serie Espeleológica y Carsológica* no. 48, 5 p., La Habana.

Liu, J.P., J.D. Milliman, 2002. Post-Glacial sea level in the western Pacific: Evidence and significance of a step-like transgression. <http://www.vims.edu/~jpliu/sealevel/>

Magaz-García, A.R. 2016. Las fracturas de distensión en las costas de Cuba. *Cubageográfica* (3):1-6.

Magaz-García, A.R., Díaz, J.L. y Hernández, J.R. 2019. Las fallas activas en el relieve. Un elemento para el estudio del peligro geológico. *Cubageográfica* 8:1-18.

Magaz-García, A. 2019. Los derrumbes de la costa sur de Guantánamo. Las huellas de la sismicidad durante el Cuaternario. *CubaGeografica* 10:1-16. (*)

Magaz, A.R., Díaz Díaz, J.L. y Hernández Santana, J.R. 2017. Las fallas activas en el relieve. Un elemento para el estudio del peligro geológico. *CubaGeográfica* 2017(8)2-18.

Mayo, N. 1970. Depósitos pleistocénicos de los cauces subterráneos abandonados de la Sierra de los Órganos: evidencias de periodos pluviales. Academia de Ciencias de Cuba *Actas* 2:57-62.

Muhs, D.R., Schweig, E.S., Simmons, K.R., Halley, R.B. 2017. Late Quaternary uplift along the North America-Caribbean plate boundary: Evidence from the sea level record of Guantanamo Bay, Cuba. *Quaternary Science Reviews* 178(2017):54-76.

Nuevo Atlas Nacional de Cuba 1989. Editado por el Instituto de Geografía y el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.

Núñez-Jiménez, A., 1984. *Bojeo*. Cuba: La Naturaleza y el Hombre. Editorial Letras Cubanas, La Habana, 702 p.

Núñez-Jiménez, A., 2012. *Litorales y mares*. Cuba: La Naturaleza y el Hombre. Editorial Ciencias Sociales, La Habana, 255 p.

Núñez Jiménez, A. *Clasificación genética de las cuevas de Cuba*. Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geografía.

Núñez Jiménez, A. y Vilas, C.A. 2016. La gran caverna de Santo Tomás. *Ed. Científico-Técnica*, La Habana, 399 p.

Ortega, F. 1983. Una hipótesis sobre el clima de Cuba durante la glaciación de Wisconsin. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 7:57-68.

Ortega, F., I. Zhuravliova 1983. Crítica a la hipótesis de "dos" pleistocenos cubanos, a la luz de la información edafológica. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 6: 63-85.

Otero, V., González A., Valdés, J. et al. 2019. *Actualización sobre la espeleometría y aspectos geomórficos del sistema cavernario Majaguas-Cantera, Sierra de San Carlos, Pinar del Río, Cuba*.

Pajón, J., I. Hernández, F. Ortega y J. Macle, 2001. Periods of wet climate in Cuba: Evaluation of expresión in karst of Sierra de San Carlos. *Interhemispheric Climate Linkages* pp 217-226, Academic Press.

Peñalver, L.L. 1982. Correlación estratigráfica entre los depósitos cuaternarios de la plataforma noroccidental de Pinar del Río y las zonas emergidas próximas. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio* (5):63-84.

Peñalver, L.L., J.R. Oro, A. Barrientos 1982. Las secuencias carbonatadas del Plioceno-Pleistoceno "humedo" de Cuba occidental. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio* (5):25-42.

Peñalver, L.L., J.R. Oro, A. Barrientos 1982. Las secuencias terrígenas del Plioceno-Pleistoceno "humedo" de Cuba occidental. *Rev. Ciencias de la Tierra y del Espacio* (5):43-62.

Peñalver, L.L., R. Lavandero, A. Barrientos 1997. Sistema Cuaternario. En G. Furrázola-Bermúdez y K. Núñez Cambra. *Estudios sobre geología de Cuba, Instituto de Geología y Paleontología*, La Habana. p. 165-178.

Peñalver, L.L., Barrientos, A., Orbera, L., Hernández, C., Estrada, V., Nápoles, E., Alvarez, J., Pérez Laso, J., Méndez, A., Fundora, M. 1998. Versión actualizada del mapa de depósitos Cuaternarios de Cuba y su plataforma insular a escala 1:500 000, *Geología y Minería'98, Memorias*, Tomo I, Sociedad Cubana de Geología, p. 559-561.

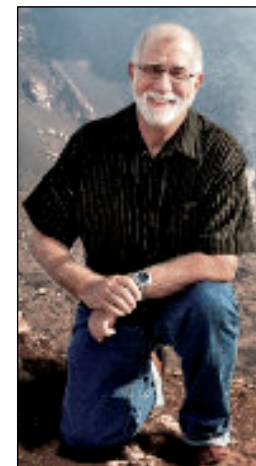
Pushcharovskiy, Yu.M. (Editor). 1988. Mapa geológico de la República de Cuba escala 1:250 000. Academia de Ciencias de Cuba y URSS. 40 hojas.

Shantzer, E.V., O.M. Petrov, G.F. Franco 1976. Sobre las terrazas marinas costeras y los depósitos relacionados con ellas (en ruso). *En Acumulación de sedimentos cuaternarios y formación del relieve*, Edit. Nauka, Moscú, p. 34-80.

Skwaletski, E. y M. Iturralde-Vinent 1971. Estudio ingeniero-geológico del carso cubano. *Serie Espeleológica y Carsológica* no. 31, 58 p.

Torre, A. de la 1963. El Terciario superior y el Cuaternario de los alrededores de Matanzas. *Editorial Academia de Ciencias de Cuba*, 51 p.

White, J. y R.D.E. MacPhee, 2001. The sloths of the West Indies: A systematic and phylogenetic review. P. 201-235, En C.A. Woods y F.E. Seiglie. *Biogeography of the West Indies, Patterns and Perspectives*, Second edition. CRC Press.



Manuel A. Iturralde-Vinent. Academic emeritus and Doctor in Geological Sciences. Has conducted geological and paleontological expeditions to the Greater Antilles, Central and South América. His leading interests are geology, paleontology, paleogeography and risk assessment. Published several contributions to the paleontology, paleogeography and origin of the Antillean biota.

<https://www.academiaciencias.cu/es/membresia/manuel-antonio-iturralde-vinent>

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.

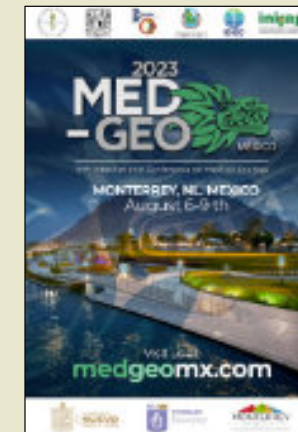
Como parte de las actividades de difusión de nuestra revista de geociencias, Tenemos una relación de buena fe y amistad con las Escuelas, sociedades y asociaciones geológicas en otros países del mundo.

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



Geología Médica

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



GeoLatinas

<https://geolatinas.org/>



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

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/>



Sociedad Geológica de España

<https://sociedadgeologica.org/>



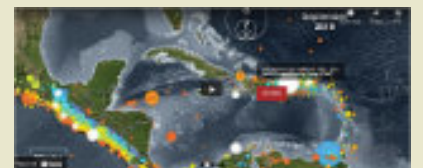
Sociedad Cubana de Geología

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



Sociedad Dominicana de Geología

<http://sodogeo.org/>



Universidad Tecnológica
del Cibao Oriental,
República Dominicana

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





Piezade Mayapán, Yucatán. INAH. MUSEO REGIONAL DE ANTROPOLOGÍA