

SEPTIEMBRE
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: Discordancia angular del Eoceno, Occidente de Venezuela. Su origen se atribuye como la respuesta isostática al desplazamiento en sentido este de la placa del Caribe respecto al margen noroccidental de Suramérica. En la imagen, formaciones Isnotú (Mioceno), al tope, y Misoa (Eoceno), en la base **(Foto J. Porras)**.

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.

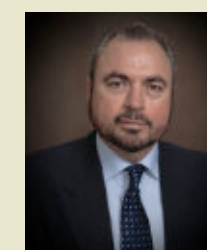
bernardo.garcia@ingenieria.unam.edu



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



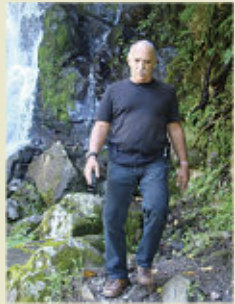
Claudio Bartolini (Ph.D.) is presently a senior exploration advisor at Petroleum Exploration Consultants Americas. He has more than 25 years of experience in both domestic and international mining and petroleum exploration, mainly in the United States and Latin America. Claudio was an associate editor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

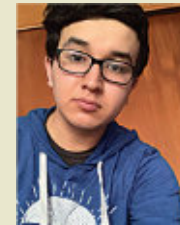
Tiene en su haber labores de investigación en Geología de Terremotos y Riesgo Geológico asociado o no a la sismicidad. Es especialista en Sismología Histórica, Historia de la Sismología y Geología venezolanas. Ha recibido entrenamiento profesional en



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

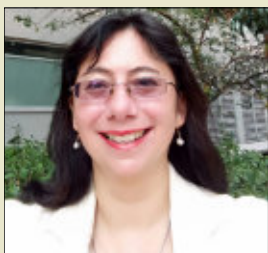
de análisis de Mineralogía Avanzada, estudiando variaciones en especies minerales, texturas, asociaciones, grados de cristalinidad, emulsiones por exsolución y elementos menores en solución sólida. Es divulgador científico centrado en la astronomía, historia de la ciencia y cultura desde 2015 en la plataforma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

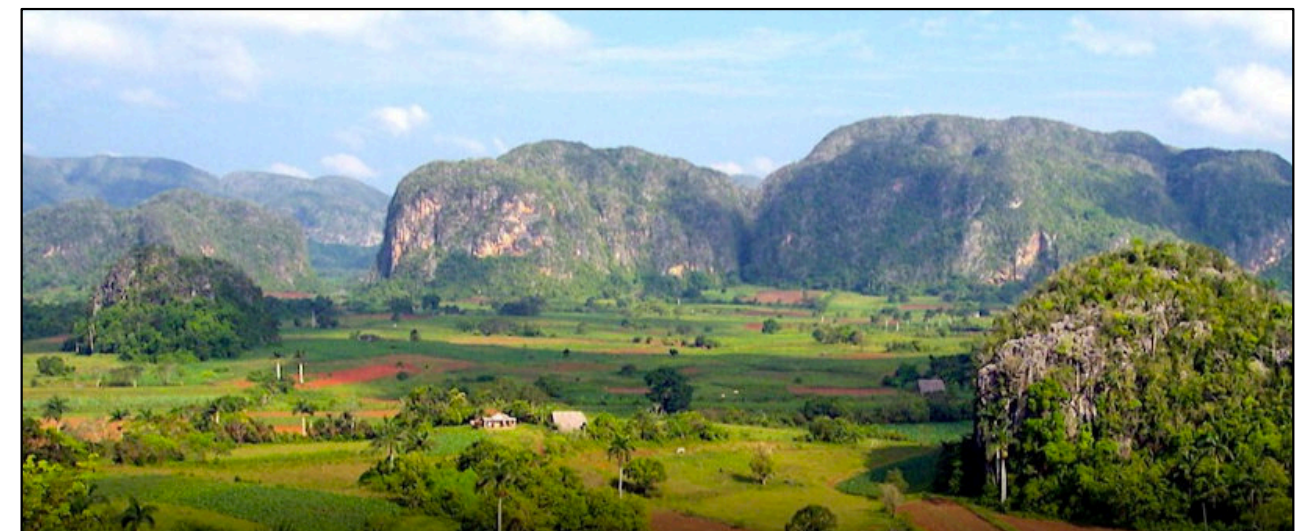
Te invitamos a que visites la página web de nuestra Revista Maya de Geociencias, donde podrán encontrar (en formato PDF), todas las revistas que hemos publicado hasta ahora, mismas que pueden descargar de la página. También estaremos incluyendo información adicional que sea de utilidad para nuestras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

<https://rio2025.iceevent.org/>

Join us for AAPG's flagship global event returning to the Latin American and Caribbean Region in 2025!

Discover the fundamental role of exploration and geoscience for meeting energy demand while transitioning to a low carbon future. Enjoy a multidisciplinary program featuring the latest advances in geoscience, technology, innovation, and public policy, and network with technical experts and industry leaders shaping the region's energy future.



<https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=BusquedaPredefinida=DGBGeolPI100K>



IPGC
5th EDITION 2025

About the Event Programme and Activities Sponsoring & Exhibition Registration
Abstract Submission

IPGC International Professional Geology Conference
5th EDITION 2025

5th IPGC
5-7 November, 2025

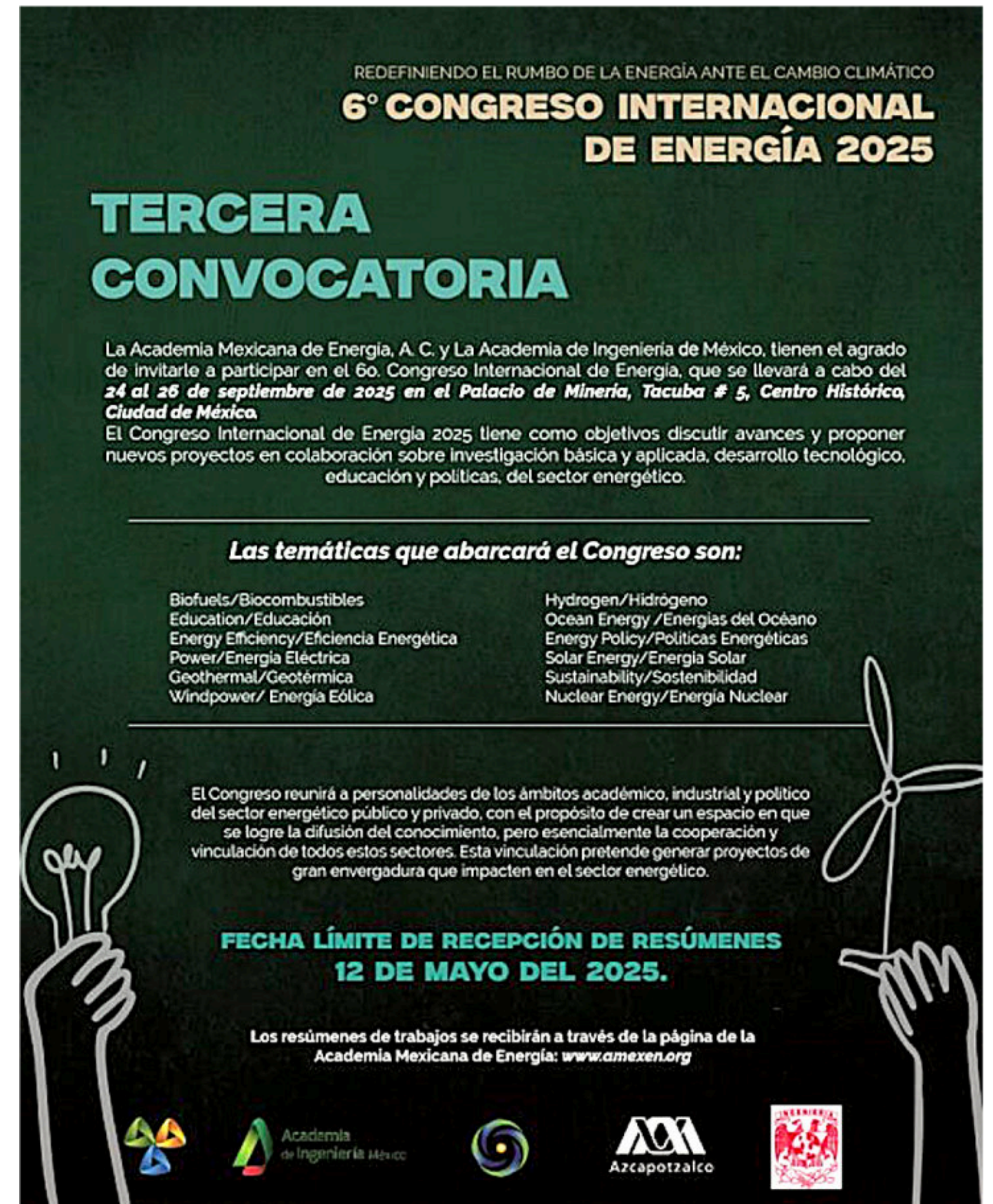
Registration
Open now!

Programme
Click here to download

Site Map
Click here to download

Building on the Past, Advancing towards the Future: Geology in the Era of Technology

<https://amexen.org/iec/2025/index.html>



REDEFINIENDO EL RUMBO DE LA ENERGÍA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO
6º CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA 2025

TERCERA CONVOCATORIA

La Academia Mexicana de Energía, A. C. y La Academia de Ingeniería de México, tienen el agrado de invitarle a participar en el 6o. Congreso Internacional de Energía, que se llevará a cabo del **24 al 26 de septiembre de 2025 en el Palacio de Minería, Tacuba # 5, Centro Histórico, Ciudad de México.**

El Congreso Internacional de Energía 2025 tiene como objetivos discutir avances y proponer nuevos proyectos en colaboración sobre investigación básica y aplicada, desarrollo tecnológico, educación y políticas, del sector energético.

Las temáticas que abarcará el Congreso son:

Biofuels/Biocombustibles	Hydrogen/Hidrógeno
Education/Educación	Ocean Energy /Energías del Océano
Energy Efficiency/Eficiencia Energética	Energy Policy/Políticas Energéticas
Power/Energía Eléctrica	Solar Energy/Energía Solar
Geothermal/Geotérmica	Sustainability/Sostenibilidad
Windpower/ Energía Eólica	Nuclear Energy/Energía Nuclear

El Congreso reunirá a personalidades de los ámbitos académico, industrial y político del sector energético público y privado, con el propósito de crear un espacio en que se logre la difusión del conocimiento, pero esencialmente la cooperación y vinculación de todos estos sectores. Esta vinculación pretende generar proyectos de gran envergadura que impacten en el sector energético.

**FECHA LÍMITE DE RECEPCIÓN DE RESÚMENES
12 DE MAYO DEL 2025.**

Los resúmenes de trabajos se recibirán a través de la página de la Academia Mexicana de Energía: www.amexen.org

Logos: AME, Academia de Ingeniería de México, Azcapotzalco, and the Mexican coat of arms.

https://drive.google.com/file/d/1vF0YkaQc_Isqn0CRpS5tYt3Affvjnl0B/view?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAAYnJpZBExNk1aTEpnZ0ppWHdscThYbQEe_DXBaHNJVD1ebdomm38wQ5fVF3HIILO8mo-gO-I9zWlxqLrTLUDlqyQR6F4_aem_zIWg4KP1JajhwNCGF-yOIQ





Más información
del congreso
<https://inageq2025.cicse.mx/>

Segunda Circular

XXXV





CONGRESO NACIONAL DE GEOQUIMICA 2025

Geoquímica en el Corazón del Valle: Innovación y Sostenibilidad para el Futuro

DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA
Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA
DEL 6 AL 10 DE OCTUBRE DEL 2025




















<https://www.inageq.com/>


<https://www.facebook.com/INAGEQ>


<https://www.instagram.com/inageqmx/>

<https://www.icog.es/TyT/index.php/2024/10/creando-sobre-el-pasado-avanzando-hacia-el-futuro-la-geologia-en-la-era-de-la-tecnologia/>

Inicio > Tierra y Tecnología > T&T 63 > Creando sobre el pasado, avanzando hacia el futuro: la geología en la...

Tierra y Tecnología T&T 63

Creando sobre el pasado, avanzando hacia el futuro: la geología en la era de la tecnología.

Por Redacción · 3 octubre, 2024 1167 0

Cuota











International Professional Geology Conference

5ª EDICIÓN - 2025

5-7 Noviembre 2025

Zaragoza (España)









**SEPTIEMBRE
SUPLEMENTO**

2025

EDICIÓN ESPECIAL XXV



TABLA DE CONTENIDOS

Integración estratigráfica/sedimentológica del Miembro Guardulio (Formación Guafita), Mioceno Inferior, Campo Guafita, Estado Apure, Venezuela.

Esdras Rodriguez y Jhonny E. Casas

Important contributions in Geosciences promise to revolutionize oil and gas exploration.

Edinson Alvarez

Análisis Multi-Atributo Evolutivo (EMAA): una aplicación en la caracterización de yacimientos de aguas profundas del Golfo de México.

Ernesto G. López Briceño, Agustín H. Domínguez Mendoza, Dámaso F. Contreras Tébar

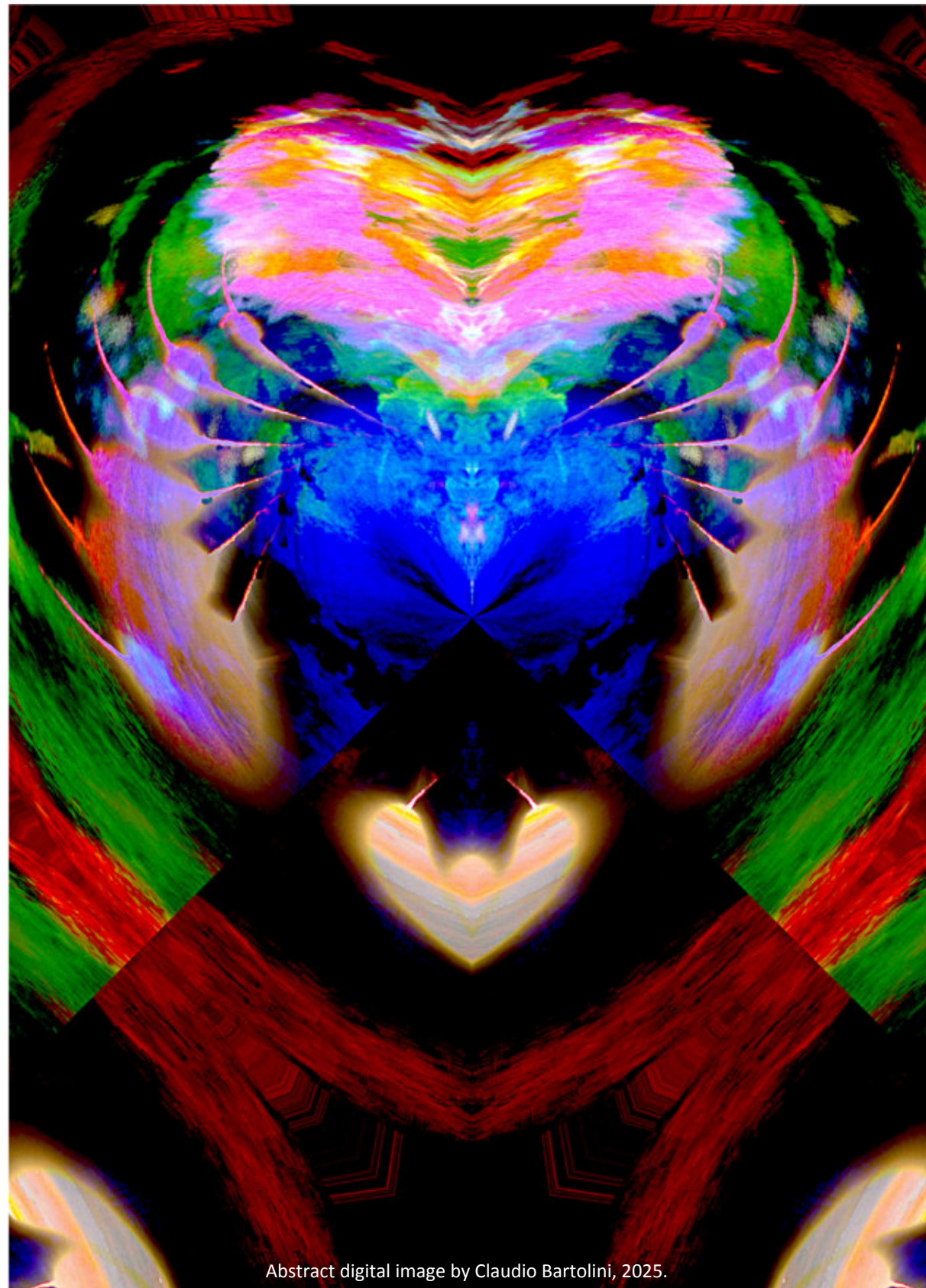
Algoritmos acoplados de flujo-transporte con densidad variable para intrusión marina en medios anisotrópicos.

Leslie F. Molerio-León

SEMBLANZAS

Manuel Fernández de Castro & José Fernández de Castro Suero - Rafael Tenreyro Pérez

Alfredo Mederos Herrera - Mariantto Castro y Luiraima Salazar-Langer



Abstract digital image by Claudio Bartolini, 2025.

Los dos días más importantes de tu vida son el día en que naces y el día en que descubres para qué.

Mark Twain

estructura y estratigrafía en la zona suroeste de la cuenca Barinas-Apure. Fuente: modificado de OSTOS y YORIS (1997).

MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El campo Guafita esta sobreimpuesto a un anticlinal con tendencia noreste, separado en dos bloques por una zona de falla de rumbo deslizante dextral denominada Guafita-Caño Limón, con un rumbo promedio N55E (Fig. 2) y con desplazamiento vertical variable. La estructura del bloque sur es un monoclinal con buzamiento aproximado de 8-10° hacia el sureste. La falla inversa La Yuca (Fig. 2), divide el bloque y termina contra la falla Guafita-Caño Limón (CHIGNE y HERNÁNDEZ 1993).

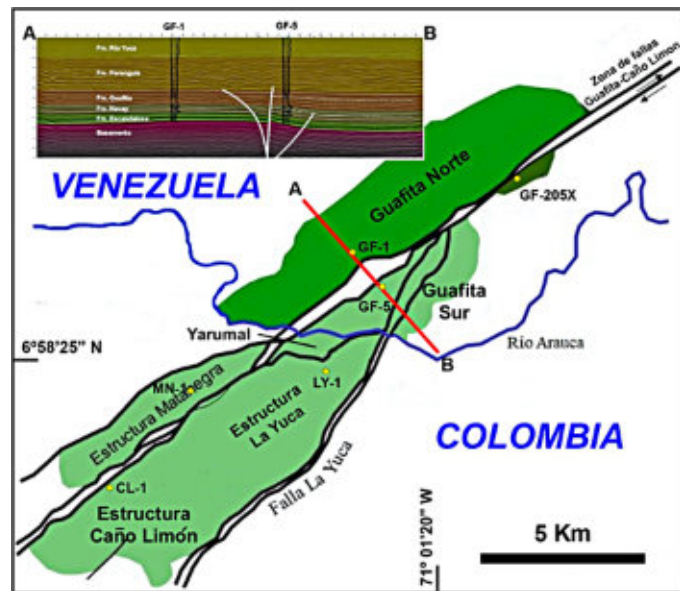


Figura 2. Mapa base mostrando las principales fallas que controlan las acumulaciones de hidrocarburos (áreas sombreadas en color verde) en los campos Guafita y Caño Limón. En la parte superior izquierda se muestra una línea sísmica NO/SE, ubicada con respecto a la principal estructura del campo Guafita y las fallas Guafita-Caño Limón. Fuente: Modificado de CHACÍN et al. (2008).

Esta cuenca tipo foreland está limitada por cuatro fallas regionales; La Yuca, Matanegra, Caño Limón y Arauca. La mayoría de las acumulaciones de hidrocarburos se deben a cierres estructurales contra los planos sellantes de falla (MOYA et al. 1989). Esta naturaleza de sello fue confirmada por contactos petróleo-agua diferentes en ambos lados de las fallas, y por pruebas de interferencia entre pozos (FERNÁNDEZ 2017).

La falla de Guafita-Caño Limón presenta un movimiento lateral dextral y desplazamientos verticales de hasta 150 m (McCOLLOUGH 1990). Además, esta falla divide el campo en dos grandes bloques; el Bloque Matanegra

al norte y el Bloque Caño Limón-La Yuca al sur, del lado colombiano; y en Guafita norte y Guafita sur, en el lado venezolano. El bloque sur de la acumulación es el más grande, y se extiende principalmente en territorio colombiano (departamento de Arauca) donde fue denominado campo Caño Limón, descubierto en 1983.

Regionalmente, la cuenca se encuentra superpuesta sobre el basamento, constituido por granitos del Escudo de Guayana. La historia depositacional de esta región comienza con el relleno de sedimentos cámbricos o incluso precámbricos (ARMINIO et al. 2013), seguidos en algunos lugares por remanentes de capas rojas continentales de la Formación La Quinta del Jurásico. Sobre los anteriores, se desarrolla la llamada discordancia pre-cretácica, y sobre ella se depositan arenas marinas de la Formación Aguardiente (unidad K3) del Albiense-Cenomaniense. Luego se depositaron sucesiones deltaicas transicionales y arenas glauconíticas con clara influencia marina del Cenomaniense-Turonense, correspondientes a la Formación Escandalosa (K2), seguidas por arenas deltaicas que hacia la base se vuelven de ambientes marino somero, con deposición de carbonatos, correspondientes a la Formación Navay (K1) de edad Coniaciense-Maestrichtiense (KISER 1997).

Tras estas formaciones cretácicas, vino un período de erosión regional, sobre el cual comienza de nuevo la sedimentación, pero ahora de las arenas fluviales a deltaicas de la Formación Guafita, representada por su Miembro Arauca de edad Oligoceno. Durante el Mioceno inferior ocurre la sedimentación del miembro superior de Guafita (Guardulio), constituido por lutitas, algunas areniscas y carbones (los miembros Arauca y Guardulio son denominados generalmente como formaciones Mirador y Carbonera respectivamente en Colombia). Diversos autores han interpretado una discordancia entre el Miembro Arauca y el Miembro Guardulio, denominada SB-30, la cual probablemente separa el Oligoceno del Mioceno Inferior (PARNAUD et al. 1995, KISER 1997). Algunos autores como BAYONA et al. (2007), postulan sin embargo que las sucesiones de areniscas basales del Oligoceno en la Cuenca Los Llanos corresponden a la sección basal de la Formación Carbonera que se encuentra en contacto conformable pero diacrónico con la sección superior mas arcillosa de la misma Formación Carbonera. Este contacto diacrónico es muy probable que sea el observado entre Arauca y Guardulio del lado venezolano.

También se ha identificado una discordancia denominada SB-21 en el tope del miembro Guardulio por PARNAUD et al. (1995), que la separa de la Formación Parángula suprayacente. Sobre Guardulio se depositaron en forma discordante, formaciones más recientes del Mioceno superior y Plioceno denominadas formalmente como Parángula y Río Yuca respectivamente (denominadas a su vez como formaciones León y Guayabo en Colombia).

Estratigrafía del campo Guafita

El campo Guafita se encuentra ubicado aproximadamente a 43 Km al suroeste de la población de Guasualito en el municipio El Amparo, distrito Páez, estado Apure. Está limitado al norte y al sur por los ríos Sanare y Arauca. El campo se encuentra dividido en Guafita Norte y Guafita Sur.

Se considera que la columna sedimentaria del campo Guafita descansa sobre lo que se ha denominado basamento pre-cretácico, en parte posiblemente constituido por una faja plegada de sedimentos del Paleozoico Inferior (AUDEMARD 1991, ARMINIO et al. 2013); sin embargo, BERNAEZ (2010) señala la presencia en algunas zonas de un graben Jurásico estratificado, interpretado en la sismica 3D del campo Guafita. Recientemente CASAS (2022), reportó rocas jurásicas rojizas (Formación La Quinta) en un pozo perforado al este de Guafita/Caño Limón. Infrayacente a esta secuencia jurásica, este pozo atravesó rocas sedimentarias verdosas de grano fino, probablemente paleozoicas y muy similares a la denominada Formación Carrizal de edad Cámbrico Inferior (DI GIACOMO 1985). Los pozos perforados tanto en Caño Limón como en Guafita, normalmente se refieren a esta sección sedimentaria más antigua con el nombre genérico de "pre-cretácico".

La secuencia sedimentaria post-jurásica (Fig. 3), comienza con areniscas y lutitas intercaladas de la Formación Aguardiente del Albiense. La parte superior de la unidad está compuesta de areniscas glauconíticas y calizas arenosas que indican el inicio de la fase regresiva. La Formación Escandalosa suprayace concordantemente a la Formación Aguardiente, y es predominantemente arenosa, con intercalaciones de lutitas y un límite superior de calizas. La Formación Escandalosa, no siempre se reconoce del lado de Caño Limón. La Formación Navay de edad Coniaciense-Maestrichtiense, está compuesta de areniscas calcáreas con delgadas capas lutíticas carbonáceas y fosfáticas, así

como calizas silíceas. MOYA et al. (1989), describe la Formación Navay en el subsuelo del campo Guafita, donde la divide en los miembros La Morita y Quevedo. Estas rocas del cretácico se encuentran erosionadas en su tope debido a una discordancia regional de posible edad Eoceno.

El Oligoceno marca un nuevo ciclo de sedimentación con las arenas basales de la Formación Guafita (Miembro Arauca), haciéndose más lutítica hacia el tope (Miembro Guardulio), considerado este último de edad Mioceno inferior. Finalmente, se depositan las formaciones del Mioceno Superior a Plioceno, Parángula y Río Yuca (Grupo Guayabo), las cuales representan la primera, un periodo de transgresión marina, y la segunda la sedimentación de moladas asociadas al levantamiento de los Andes de Mérida (CHIGNE y HERNÁNDEZ 1993, KIESER 1997).

Una comparación cronoestratigráfica entre el campo Guafita y el campo Caño Limón se presenta en la Figura 4, donde también se muestran perfiles de pozos de ambos campos y se establece la equivalencia entre ellos a fin de poder manejar y comprender las diferentes nomenclaturas estratigráficas empleadas a ambos lados de la frontera entre Venezuela y Colombia.

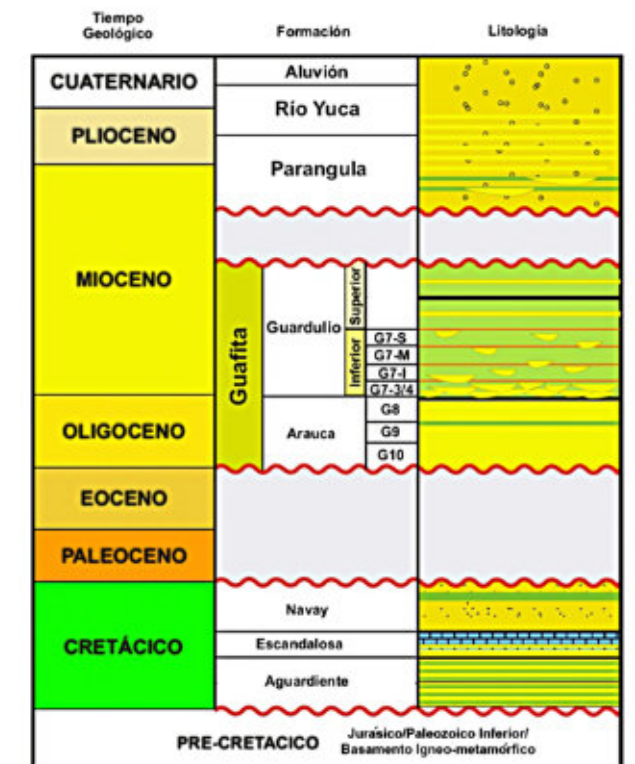


Figura 3. Columna estratigráfica generalizada del Campo Guafita

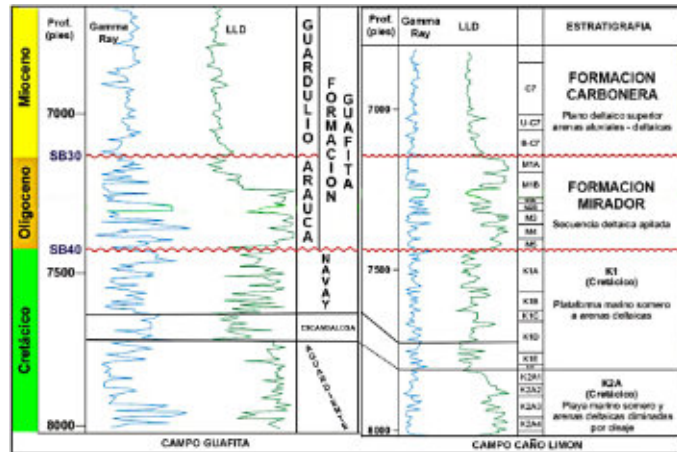


Figura 4. Comparación cronoestratigráfica entre perfiles de los campos Guafita y Caño Limón

Formación Guafita

ORTEGA et al. (1987) proponen el nombre Formación Guafita para una sucesión estratigráfica compuesta de areniscas basales deltaicas (Miembro Arauca) del Oligoceno y una secuencia lutítico-arenosa (Miembro Guardulio) del Mioceno Inferior. La Formación Guafita es discordante sobre estratos del Cretácico, e infrayacente a una sección interpretada como la inundación de la cuenca (Formación Parángula) sobre la que suprayacen depósitos tipo molasas de la Formación Río Yuca.

La denominación de Formación Guafita proviene del pozo Guafita-2X o GF-2X (Fig. 5), ubicado en el mencionado campo, y se refiere al intervalo entre 6020 pies y 7735 pies, seleccionado por ORTEGA et al. (1987), como sección tipo de la nueva formación. La sección basal denominada como Arauca, corresponde al miembro inferior de la formación y está referido al río Arauca, que constituye la línea divisoria natural entre Venezuela y Colombia, precisamente en el área donde está ubicado el campo Guafita. El miembro superior denominado Guardulio, ha sido nombrado por la cercanía del caño Guardulio, tributario del río Sarare, situado 1.600 m al sureste del pozo GF-2X (ORTEGA et al. 1987).

En sentido general y regional, se asume que el Miembro Arauca podría corresponder a la sección basal de la Formación Carbonera (SAEID et al. 2022), o probablemente a lo que en el lado norte de la cuenca de Los Llanos, se denomina Formación Mirador. El Miembro Guardulio, correspondería así a la parte media-superior de la Formación Carbonera. Se ha interpretado una discordancia entre el Miembro Guardulio y el Miembro Arauca, la cual probablemente

separa el Oligoceno del Mioceno Inferior (BRISTOW 1987, PARNAUD et al. 1995, KISER 1997).

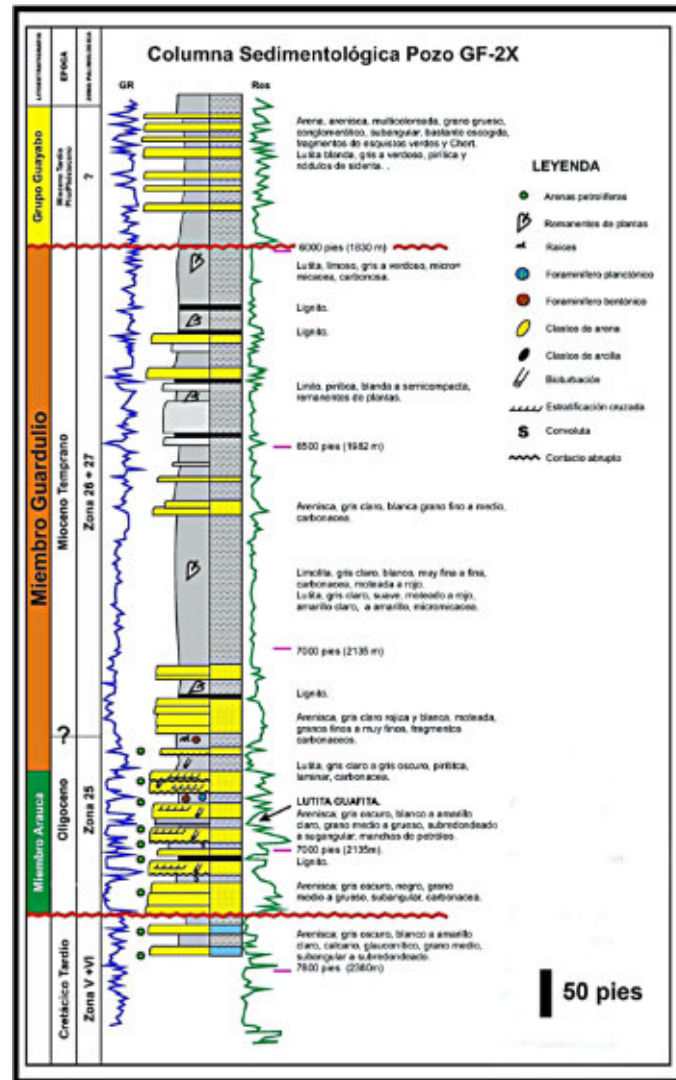


Figura 5. Columna sedimentológica y registro del pozo GF-2X (Holoestratotipo de la Formación Guafita). Fuente: Modificado de ORTEGA et al. (1987).

La Formación Guafita no aflora en superficie, y tiene su sección tipo (Holoestratotipo), como ya se mencionó, en el pozo GF-2X (Fig. 5), con secciones de referencias (Hipoestratotipos) en los pozos GF-1X y GF-5X, todos del campo Guafita, perforados por la empresa Corpoven, S.A., filial de Petróleos de Venezuela S.A., durante los años 1984 y 1985 (ORTEGA et al. 1987). GF-5X posee el honor de ser el pozo perforado en el campo, con la mayor tasa de producción durante sus pruebas iniciales, proveniente de la Formación Guafita, con un total de 4.250 barriles diarios de petróleo liviano de 30° API (CORPOVEN 1985).

Los crudos producidos en el campo Guafita fueron originados a partir de materia orgánica sedimentada en un ambiente marino, con aportes importantes de materia orgánica terrestre y en condiciones relativamente más oxigenadas o relativamente menos reductoras, lo cual lo diferencia de los crudos producidos más al norte dentro de la sub-cuenca de Barinas (LOPEZ y LO MONACO 2011).

Miembro Arauca

Este miembro está compuesto principalmente de areniscas (arenitas cuarzosas, arcóscicas, líticas, vacas cuarcíticas y arcóscicas) de color gris claro, pardo lechoso a translucido, grano fino a grueso, subangulares a subredondeados (Fig. 6), moderadamente a muy bien escogidas, con matriz arcillosa caolinitica. El cuarzo es generalmente del tipo monocristalino, con relativa abundancia del tipo policristalino (ORTEGA et al. 1987). Como minerales autigénicos, es común encontrar pirita, óxido de hierro y cierta cantidad de esferulitas de siderita. Otros constituyentes que se presentan en menor proporción son feldespatos, y accesorios como turmalina, circón y rutilo. Los granos de cuarzo en las vacas, generalmente se encuentran flotando en una matriz arcillosa (RODRÍGUEZ 2012). Se observan numerosas estructuras sedimentarias tales como estratificación paralela, cruzada, ondulada lenticular, rizaduras, estructuras de carga y frecuentes restos de plantas.

Se ha establecido una nomenclatura informal u operacional para la explotación de yacimientos de hidrocarburos en el Miembro Arauca, subdividiéndolo de base a tope en las arenas o unidades G-10, G-9 y G-8 (Fig. 4), las cuales son productoras de petróleo liviano en el Campo Guafita, y en su equivalente estratigráfico (formaciones Mirador y Carbonera Inferior), en el Campo Caño Limón del lado de Colombia (CLEVELAND y MOLINA 1990).

Miembro Guardulio

Este miembro consiste de una alternancia monótona de lutitas y arcilitas, con una menor proporción de areniscas gris claro cuarzosas. Las lutitas son de color gris oscuro a gris verdoso, carbonosas y localmente moteadas por óxidos de hierro, con tonalidades de rojo, ocre amarillento, púrpura y marrón (Fig. 6), conteniendo palinoflora del Mioceno inferior.

Las arcilitas están generalmente manchadas por óxidos ferrosos que les imparten tonalidades rojizas, púrpura,

ocre, marrón, pero también se pueden observar con colores blanquecinos (caoliniticas) y hasta verdosas (Fig. 6). Frecuentemente estas rocas se presentan meteorizadas en algunos niveles, con costras de óxidos ferrosos, posiblemente indicativo del desarrollo de paleosuelos. En el análisis de difracción de rayos X, las arcillas están compuestas fundamentalmente por caolinita (68-89%), illita/smectita (10-25%), así como trazas de clorita. En algunos niveles estratigráficos es común observar capas de lignitos o carbones (Fig. 6), así como restos de plantas, en forma de tallos y raíces. En el miembro se han descrito algunas bioturbaciones entre las que destaca Naktodemasis bowni, una madriguera meniscada típica de paleosuelos en depósitos aluviales (SMITH et al. 2008).

Las areniscas son de tipo grauwas, vacas cuarzosas y arenitas arcóscicas, exhibiendo colores grisáceos, gris claro a blanquecinos o cremosos, son de grano fino a grueso, subangular a subredondeado, moderadamente a bien escogidas, con moderada consolidación y matriz arcillosa caolinitica (ORTEGA et al. 1987). En sección delgada, los granos de cuarzo son fundamentalmente monocristalinos y ocasionalmente policristalinos (RODRÍGUEZ 2012).

ORTEGA et al. (1987) interpretan para el Miembro Guardulio, un ambiente de sedimentación predominantemente terrestre a fluvio-deltaico, prevaleciendo hacia la base condiciones de pantanos de agua dulce, con canales fluviales probablemente con poca pendiente y baja energía hidrodinámica. Hacia el tope del miembro, los mismos autores mencionan que parecieran existir condiciones más marinas, donde se puede observar una mayor proporción de lutitas fuertemente radioactivas, además de abundante cantidad de exinita en los macerales.

El Miembro Guardulio ha sido dividido en cuatro unidades operacionales (G7-3/4, G7-2I, G7-2M y G7-2S) para los yacimientos del Campo Guafita Sur, donde ha producido petróleo liviano. Este miembro es equivalente a la Formación Carbonera (probablemente a las unidades C1-C6) en el campo Caño Limón del lado de Colombia (Fig. 5).

Bioestratigrafía y Edad de la Formación Guafita

Análisis bioestratigráficos han sido llevados a cabo en muestras de núcleos tomados en el campo Guafita. Los resultados mas importantes de señalar, se resumen a continuación:

Micropaleontología

DE LIMA et al. (2007), realizó el estudio de foraminíferos para los núcleos del pozo GF-205X, en diversas muestras dentro del Miembro Arauca y Guardulio, identificando a la profundidad de 7912,3 pies muy pocos especímenes de *Ammobaculites*, y a 7916 pies, foraminíferos aglutinados uniseriales, y fragmentos de formas aglutinadas más complejas con las cámaras rellenas de materia orgánica, posiblemente *Textularia* sp. y *Ammobaculites* sp. En la muestra correspondiente a 7919,5 pies, el autor ya indicado, identificó *Miliammina* sp. La presencia de esta escasa microfauna aglutinada y mal preservada, encontrada únicamente en el Miembro Arauca del referido núcleo, no permitió asignación de especies, ni permitió definir edad.

Palinología

ORTEGA et al. (1987) reportan para el Miembro Guardulio, la presencia de palinomorfos entre los que destacan *Laevigatosporites* sp., *Magnastriatites grandiosus*, *Mauritiidites franciscoi*, *Polypodiisporites usmensis*, *Retitricolporites guianensis* y *Retitricolporites irregularis*, asignándolos al Mioceno temprano.

DE LIMA et al. (2007) realizaron un estudio palinológico en diversos intervalos correspondientes tanto a muestras de núcleo, como a muestras de canal, en el pozo GF-205X (Guafita: 6200-8500 pies), siguiendo la zonación palinológica de MULLER et al. (1987), para polen y esporas, con los siguientes resultados:

-Intervalo 6120-6710 pies (muestras de canal), indicativas de una edad Mioceno. En este intervalo, el rango de edad se basó en la presencia de palinomorfos terrestres *Retitricolporites guianensis* y *Jandufouria seamrogiformis* en el nivel 6120 a 6150 pies.

-Intervalo 6710-7890 pies (núcleo y canal), correspondientes al Miembro Guardulio. Se determinó la presencia de varios palinomorfos terrestres, y específicamente *Echitricolporites maristellae* en el nivel 6710-6740 pies, todos ellos pertenecientes a la zona 26 y 27 (Mioceno inferior) según la zonación de MULLER et al. (1987). No se observaron evidencias de influencia marina.

-Intervalo 7890-8140 pies (núcleos), correspondientes al Miembro Arauca. La edad se determinó en base a la presencia de palinomorfos terrestres como: *Cicatricosisporites doregensis* y *Jandufouria seamrogiformis* en los niveles de 7890 a 8138 pies, así como también *Crassieptopertites colombianus* en el

nivel 8138 pies, donde los autores sugieren ambientes continentales a próximo costero. Según la zonación de MULLER et al. (1987) la asociación corresponde a la zona 25 de edad Oligoceno. En resumen, todos los palinomorfos identificados indican un ambiente con dominancia terrestre que pudiese llegar a próximo-costero, probablemente relacionados a la presencia de marismas o estuarios. Las muestras de la sección basal (8150-8500 pies) del Miembro Arauca no mostraron palinomorfos diagnósticos de edad.

DE LIMA et al. (2007) concluyen, en base a la integración de evidencias sedimentológicas y bioestratigráficas, que la sedimentación del Miembro Guardulio ocurrió en un ambiente de planicie deltaica alta.

Edad de Mirador/Arauca en la cuenca Los Llanos (Colombia)

Numerosos estudios bioestratigráficos han sido llevados a cabo en la cuenca Los Llanos de Colombia, a fin de establecer el marco cronoestratigráfico de la llamada Formación Mirador (JARAMILLO et al. 2009), algunas veces denominada “Falso Mirador”, depositada sobre la discordancia del Eoceno. Esta formación corresponde al Miembro Arauca en el lado venezolano (Fig. 4).

La practica común entre los geólogos petroleros colombianos ha sido la de usar el termino Mirador indiscriminadamente en la cuenca Los Llanos, pero el problema radica en su alto grado de variabilidad en cuanto a la edad de sedimentación, que puede oscilar desde el Eoceno Medio hasta el Oligoceno superior, y contempla todas aquellas areniscas basales depositadas sobre la discordancia del Eoceno. Esto hace que la llamada Formación Mirador sea altamente diacrónica a todo lo largo de la mencionada cuenca, aunque no invalida su uso como nombre formacional (AZPIRITXAGA y CASAS 1989).

JARAMILLO et al. (2009) dató bioestratigráficamente 44 secciones en la cuenca Los Llanos, estableciendo mapas de edades por región. En la Figura 7 puede observarse como la Formación Mirador o Miembro Arauca de la Formación Guafita, cae dentro de la zona palinológica T10-11 (correspondiente al tope del Oligoceno y base del Mioceno) en la región de Caño Limón-Guafita (Fig. 6). Esta datación de Mirador/Arauca, coincide con la datación palinológica en núcleos del campo Guafita (Oligoceno), y donde el Miembro Guardulio suprayacente (equivalente a la Formación Carbonera)

comenzó a ser depositado a partir del Mioceno Inferior (Aquitaniense). Este rango de edades se encuentra dentro del lapso de tiempo estimado para la tectonosecuencia regional postulada por PARNAUD et al. (1995) para el Miembro Guardulio, cuyos limites discordantes fueron ubicados por estos autores entre SB-30 y SB-21.

AMBIENTES DE SEDIMENTACIÓN DEL MIEMBRO GUARDULIO

La descripción e interpretación detallada de los núcleos de los pozos GF-26, GF-180 y GF-205X efectuada por RODRÍGUEZ (2012), refleja sucesiones arenosas granodecrecientes, con bases erosivas asociadas a clastos basales tipo “lag”. Las areniscas exhiben estructuras sedimentarias formadas por migración de dunas en flujo de tracción y laminación cruzada por migración de rizaduras. Por otra parte, las lutitas se caracterizan por su coloración gris verdoso, con esporádicas laminaciones delgadas de arenisca de grano fino a limolítico, algunas trazas fósiles de naturaleza continental y horizontes alterados pedogenéticamente.

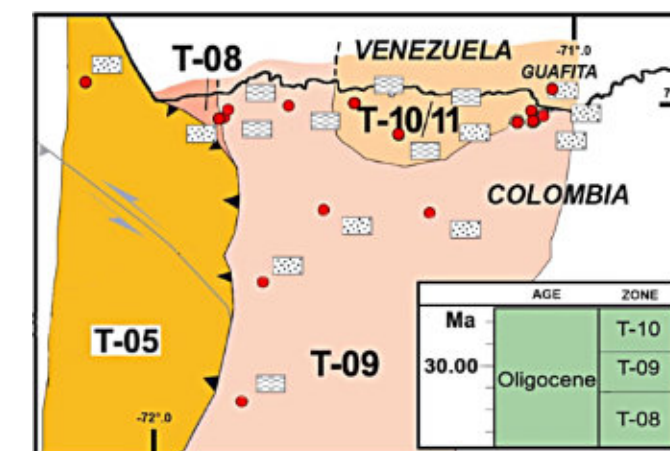


Figura 6. Distribución espacial de la edad, basada en las zonas palinológicas de los sedimentos inmediatamente sobre la discordancia del Eoceno. Estos sedimentos son denominados Formación Mirador o “Falso Mirador”, este último considerado como la zona basal de la Formación Carbonera (en Colombia), y siendo denominado Miembro Arauca de la Formación Guafita en Venezuela. Puntos de control con círculos rojos. Fuente: Modificado de JARAMILLO et al. (2009).

Basado en el análisis y asociación de facies descritas, se interpreta que las areniscas dentro del Miembro Guardulio, se depositaron en un ambiente de canales fluviales meandriformes dentro de una llanura aluvial. La migración lateral de los canales y su subsecuente estrangulamiento, formaron barras de meandros, que evolucionaron en el tiempo, generando cinturones de

canales (MIALL 1996). La presencia de horizontes alterados pedogenéticamente, sugiere períodos de exposición subaérea con estabilidad geomorfológica, generando de esta manera, unidades genéticas limitadas por paleosuelos (BEHRENSMEYER y TAUXE 1982, RETALLACK 1988, MARRIOTT y WRIGHT 1993). HIGGS (1997), describe en general a las formaciones Mirador y Carbonera (equivalente de Guardulio), en la cuenca de Los Llanos, como depósitos de llanura aluvial (sin influencia de mareas), donde sus facies incluyen canales fluviales, depósitos lacustres y paleosuelos.

La asociación de facies sedimentarias descritas en el núcleo del pozo GF-180, presenta notables similitudes con el modelo de facies de ALLEN (1970) para canales meandriformes. Estos rasgos sedimentológicos soportan la interpretación de un ambiente fluvial para la unidad, a diferencia de trabajos previos que señalan un ambiente más marino (ORTEGA et al. 1987, CHIGNE y HERNÁNDEZ 1993, HENAO y HERNÁNDEZ 2006). Aunque el perfil vertical de los perfiles de pozos o de los núcleos, no es un indicador preciso del estilo sedimentario del canal (MIALL 1992), rasgos morfológicos observados en la sísmica 3D, como se describirá en capítulos posteriores, soportan una interpretación de ambiente fluvial de tipo meandriforme.

Debe resaltarse que, aunque no existen núcleos en las unidades superiores del Miembro Guardulio, la presencia de carbones y lutitas más radiactivas interpretadas a partir de los perfiles de pozos, sugiere un ambiente un poco más transicional. ORTEGA et al. (1987) menciona macerales del tipo exinita en la parte más alta del Miembro Guardulio, posiblemente indicando un medio lacustre o incluso marino somero, aunque esto ultimo no ha sido comprobado.

SUPERFICIES ESTRATIGRÁFICAS CLAVES

Discordancias

El Miembro Guardulio se define como una secuencia estratigráfica limitada por las discordancias SB-30 en la base, y que la separa del infrayacente Miembro Arauca; así como de una discordancia denominada SB-21 en el tope del miembro (PARNAUD et al. 1995), que la separa de la Formación Parángula suprayacente. Tradicionalmente la posición de la discordancia SB-21 se reconoce fácilmente en los perfiles de pozos por un cambio abrupto en la respuesta del perfil de conductividad. Por otra parte, la discordancia hacia la base del miembro, conocida como SB-30 se ha

reconocido ampliamente mediante análisis palinológicos (KISER 1997), y mediante relaciones de truncamiento erosional de las capas infrayacentes, usando correlaciones de perfiles de pozos.

El análisis de los perfiles de pozos, proporcionan algunos criterios adicionales para ubicar la discordancia SB-30. Dicha discordancia se ubica suprayacente a la última aparición de capas de carbón y en la base de la primera ocurrencia de areniscas petrolíferas (RODRÍGUEZ 2012) en el campo Guafita. Dos rasgos relevantes son notables:

- a) existe un cambio en los valores de radioactividad entre las lutitas suprayacentes e infrayacentes a la SB-30.
- b) los carbones al tope del Miembro Arauca, se truncan con la SB-30 expresando un límite erosional que efectivamente define a dicha discordancia.

Inicialmente se pensaba en un carácter local para la discordancia SB-30, probablemente restringida a la cresta y flancos del Arco de Arauca (BRISTOW 1986, KISER 1997), pero el análisis efectuado por PARNAUD et al. (1995), enmarcado en un enfoque de estratigrafía sísmica, correlaciona la discordancia SB-30 como un límite de secuencia de carácter regional, posiblemente relacionado al levantamiento inicial de los Andes en Venezuela (BERMÚDEZ et al. 2010)

La discordancia SB-30 se reconoce claramente en los pozos de Guafita a través del perfil espectral de rayos gamma. La Figura 7 muestra un ejemplo en un pozo genérico del campo Guafita, donde se observa claramente un cambio abrupto en la relación torio/potasio. Este cambio ocurre normalmente como se mencionó, suprayacente a la última aparición de capas de carbón y en la base de las primeras areniscas. Asociado al cambio de la relación torio/potasio, también en muchos pozos se observa un aumento notable en la radioactividad total de las lutitas dentro del Miembro Arauca (Fig. 7).

Carbones

En la descripción de los núcleos de los pozos GF-26 y GF-205X efectuada por RODRÍGUEZ (2012), se reconocieron algunas capas de carbón por debajo de la SB-30. A través de la calibración con los perfiles de porosidad y densidad/neutrón, se interpretó que altos valores de porosidad neutrón y bajos valores del perfil densidad/neutrón, corresponden a estas capas de carbón. Por medio de este criterio, se identificaron

algunas capas de carbón adicionales en zonas sin núcleos, correspondientes a los niveles superiores de Guardulio.

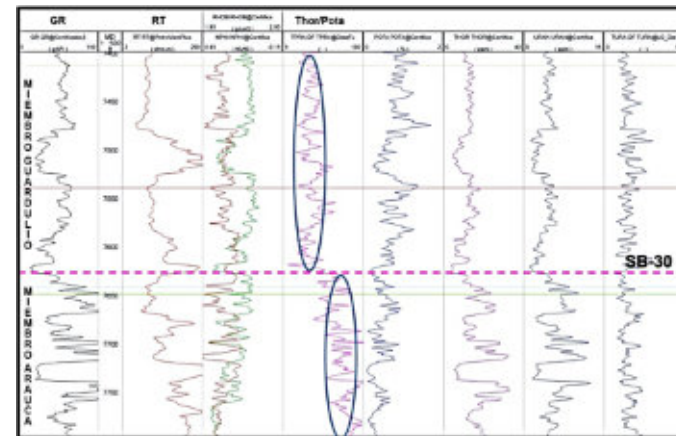


Figura 7. Ubicación de la discordancia SB-30 entre los miembros Arauca y Guardulio, basado en cambios del perfil espectral de rayos gamma. La relación Torio/Potasio muestra un cambio abrupto en su tendencia, según se resalta con los óvalos.

La presencia en el núcleo del pozo GF-205X, de un horizonte con mayor proporción de capas de carbón, coteja con un evento sísmico importante en el Campo Guafita que permitió delimitar grupos de facies sísmicas, como se explicará más adelante. Estas anomalías sísmicas presentan gran continuidad lateral, sobre todo en la denominada Formación Carbonera del lado colombiano, donde cotejan favorablemente con niveles estratigráficos superiores en dicha formación, y donde la presencia de capas de carbón es más abundante (CASAS 2022).

Paleosuelos

Dentro de la sucesión del Miembro Guardulio se identificaron diversas superficies claves a través de los núcleos y perfiles de pozos, que corresponden a paleosuelos. En la unidad operacional G7, correspondiente a la sección inferior de Guardulio, se determinó que dichos paleosuelos juegan un rol importante para la subdivisión de unidades estratigráficas genéticas, y fueron utilizados como capas marcadoras de tiempo estratigráfico, según los criterios expuestos por BEHRENSMEYER y TAUXE (1982), y RETALLACK (1988), donde la aplicación o su uso como herramienta de correlación, calibrada con sísmica, ha sido probada con éxito (CHALCO et al. 1997, CASAS et al. 2007, RODRÍGUEZ et al. 2013).

Cuatro de los marcadores lutíticos mostrando tanto altos valores en el registro de rayos gamma, como baja resistividad, fueron identificados en la unidad operacional G7, y que además cotejan con horizontes alterados pedogenéticamente en los núcleos. Estos a su vez dividen a la unidad operacional G7 en cuatro sucesiones limitadas por los mencionados paleosuelos (Fig. 8). Estas cuatro sucesiones sedimentarias fueron denominadas de base a tope G7-3/4, G7-2I (inferior), G7-2M (medio) y G7-2S (superior). Se han descrito paleosuelos en diversos niveles estratigráficos de las formaciones Mirador y Carbonera (equivalentes a los Miembros Arauca y Guardulio), en la cuenca de Los Llanos (Colombia), embebidos dentro de depósitos de grano fino, interpretados como llanura aluvial (HIGGS 1997) o en depósitos fluvio-deltaicos (SAEID et al. 2022).

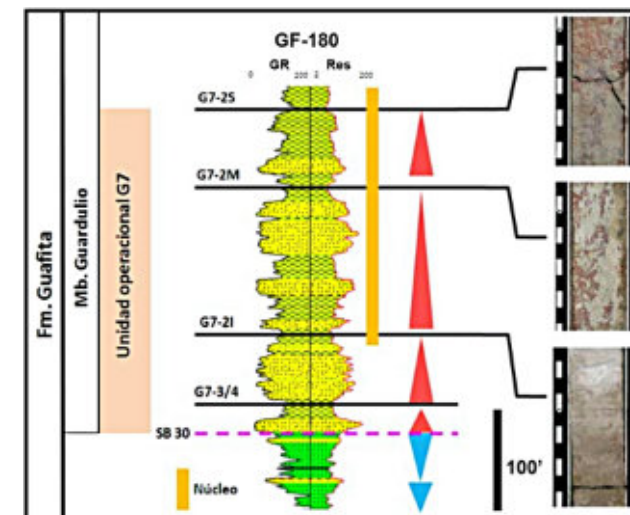


Figura 8. Marcadores lutíticos identificados con altos valores en el registro de rayos gamma y bajos valores de resistividad, coincidentes con paleosuelos, y que dividen a la unidad operacional G7 en cuatro unidades sedimentarias (G7-2S, G7-2M, G7-2I y G7-3/4).

JERARQUÍA DE LAS SUPERFICIES ESTRATIGRÁFICAS

Los procesos formadores de secuencias tienen periodicidades naturales. Esto llevó a la definición de jerarquías de secuencias basadas en la duración de los ciclos, como lo han hecho autores como VAIL et al. (1977, 1977b), VAN WAGONER et al. (1988, 1990), MITCHUM y VAN WAGONER (1991). Queda implícito que las superficies limitantes de estas secuencias también son jerárquicas. No obstante, cuando existe la ausencia de un control geocronológico muy preciso, CATUNEANU (2006, 2017) recomienda referirse a las secuencias en un sentido relativo, tales como frecuencia inferior versus frecuencia superior, e interpretar su

importancia estratigráfica relativa basada en criterios que pueden ser observados en el registro sedimentario.

Basado en el estudio sísmico de PARNAUD et al. (1995), donde se subdivide la columna sedimentaria en tectonosecuencias, la Figura 9 muestra gráficamente la importancia estratigráfica relativa de las superficies identificadas en el Miembro Guardulio, a distintas escalas de observación. Dos discordancias regionales identificadas como SB-30 y SB-21, forman las superficies limitantes de la tectonosecuencia T5 de PARNAUD et al. (1995), equivalente al Miembro Guardulio. La nomenclatura de PARNAUD et al. (1995) usa abreviaturas como T4, T5, ya que provienen de la palabra Terciario (T), mientras que el número cinco (5) significa que correspondería la quinta tectonosecuencia del Terciario definida por este autor en la región.

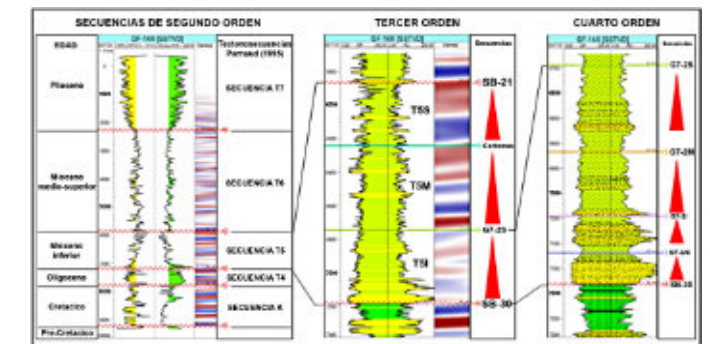


Figura 9. Jerarquía de unidades estratigráficas secuenciales. Fuente: Modificado de RODRÍGUEZ et al. (2013).

Según la geocronología expuesta por PARNAUD et al. (1995) para el área de estudio, las tectonosecuencias pueden ser ordenadas según el enfoque de VAIL et al. (1977a, 1977b), restando el tiempo de la SB-30 menos la SB-21, por lo que el lapso de tiempo para la tectonosecuencia T5 sería de 9 Ma y es jerarquizada como una secuencia de segundo orden según los esquemas tradicionales de estratigrafía secuencial (SEPM 2024). En este trabajo, dicha tectonosecuencia T5 fue dividida (en el área de estudio), en tres unidades, limitadas por superficies claves correlacionables tales como discordancias, paleosuelos y carbones (Fig. 9). Dividiendo ese lapso de tiempo de 9 Ma entre las tres unidades constituyentes de orden superior, su lapso de tiempo geológico sería de aproximadamente 3 Ma cada una y serían jerarquizadas como secuencias de tercer orden. Manteniendo consistencia con la terminología usada por PARNAUD et al. (1995), estas unidades de tercer orden fueron denominadas T5-I (inferior), T5-M (medio) y T5-S (superior) de base a tope (Fig. 10). Asimismo, la unidad de tercer orden T5-I fue a su vez

subdividida en cuatro unidades, que fueron jerarquizadas como unidades de cuarto orden (Fig. 9) con lapsos de tiempo de sedimentación cercanos a 1 Ma.

Las superficies estratigráficas de frecuencias superior limitadas por paleosuelos e identificadas por RODRÍGUEZ et al. (2013), dividirían entonces internamente a la unidad de tercer orden T5-I (operacionalmente denominada G7) en cuatro unidades sedimentarias de alta frecuencia (cuarto orden), que en orden ascendente fueron denominadas G7-3/4, G7-2I, G7-2M y G7-2S (Fig. 9), como ya se explicó anteriormente. El trabajo detallado aquí expuesto, se centrará principalmente en la unidad T5-I, ya que es el intervalo que contiene las areniscas productoras de hidrocarburos en el campo Guafita.

FACIES SÍSMICAS

En el año 2000 se adquirió en el campo Guafita un levantamiento sísmico 3D de 70 Km² que cubrió casi todo el campo. La calibración de la sísmica con los pozos reveló que los límites de las unidades de facies sísmicas corresponden a marcadores tales como paleosuelos, carbón y discordancias, que a su vez son los límites de las unidades sedimentarias de tercer orden definidas en el capítulo anterior (Fig. 9). Utilizando la sísmica 3D, fue posible reconocer estas tres unidades de facies sísmicas dentro de la tectonosecuencia T5 de PARNAUD et al. (1995), denominadas como se explicó, en orden ascendente T5-I, T5-M y T5-S. Estas unidades están limitadas por las superficies estratigráficas claves identificadas en núcleos y perfiles de pozos detalladas en los capítulos anteriores. La Figura 10 muestra un ejemplo de los patrones internos de las unidades de facies sísmicas reconocidas dentro del área de estudio.

La facies sísmica T5-I (Fig. 10), se caracteriza por tener patrones sísmicos internos con reflectores discontinuos y subparalelos. Para ambientes de carácter fluvial continental, CANT (1992), propone que la discontinuidad de reflectores con numerosas amplitudes variables, indica muy probablemente la presencia de lutitas de llanura de inundación, cortadas por areniscas de relleno asociadas a canales en depósitos fluviales.

La facies sísmica T5-M (Fig. 10), está compuesta por reflectores continuos, paralelos y de mayor frecuencia con respecto a la facies sísmica T5-I. Esta sección estratigráfica no cuenta con información de núcleos, sin

embargo, se asume un ambiente de sedimentación con condiciones subaéreas, dada la presencia de capas de carbones interpretadas en los perfiles de pozos (ORTEGA et al. 1987). Muy probablemente la continuidad de los reflectores sea generada por cuerpos estratigráficos continuos lateralmente, asociados a la preponderancia de la llanura aluvial.

La facies sísmica T5-S (Fig. 10), se caracteriza por un patrón de reflectores continuos, paralelos y de baja frecuencia relativo a la facies sísmica T5-M. Este intervalo es principalmente lutítico e interestratificado, con algunas capas de carbón, basado ello en la interpretación de los perfiles de pozos, lo cual probablemente le imparte dicho carácter a la respuesta sísmica.

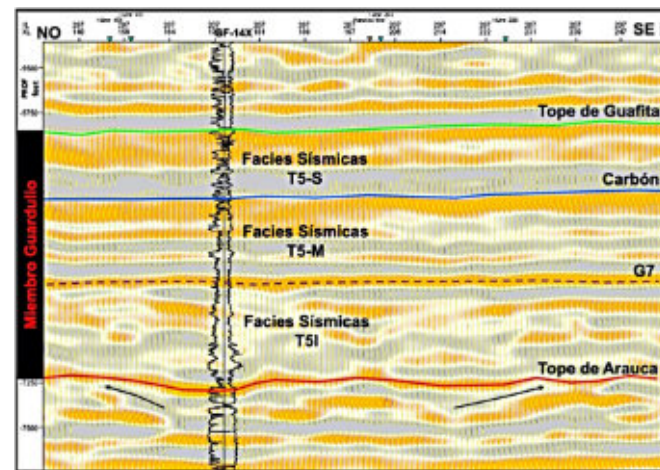


Figura 10. Patrones internos de las unidades de facies sísmicas reconocidas dentro del Miembro Guardulio en el área de estudio. Modificado de RODRIGUEZ et al. (2013).

CONJUNTOS DE PARASECUENCIAS

Cada una de las unidades sísmicas definidas anteriormente está compuesta de varias parasecuencias apiladas verticalmente, fácilmente identificadas en los perfiles de pozos y en los núcleos existentes; por lo tanto, en este trabajo se interpreta que cada unidad de facies sísmica, constituye un conjunto apilado de parasecuencias.

Conjunto de parasecuencias T5-I

Este conjunto está limitado en su base por la discordancia SB-30 y en su tope por el paleosuelo G72S (Figs. 7 y 11). En general, la parte suroeste de la falla Guafita-Caño Limón y la Yuca parecen tener mayor levantamiento, probablemente asociado al efecto del Arco de Arauca (KISER 1997); por lo tanto, los cambios de espesores (disminución), observados a lo largo del

cubo sísmico en esta unidad, probablemente estén asociados a las principales fallas del Campo Guafita, lo cual podría sugerir un control estructural sobre la sedimentación de este conjunto. Para esta unidad, se dispone de la información de varios núcleos, y la misma comienza con varios ciclos de areniscas fluviales apiladas, exhibiendo patrones de afinamiento hacia el tope, finalizando con una lutita con fuerte alteración pedogenética.

Conjunto de parasecuencias T5-M

Este conjunto está limitado en su base por el paleosuelo G7-2S y en su tope por capas de carbón (Figs. 7 y 11). Los espesores son más constantes comparados con el conjunto infrayacente; sin embargo, RODRÍGUEZ (2012) observa un cambio de espesor al cruzar la falla la Yuca, enfatizando nuevamente la posibilidad de un control estructural sobre la sedimentación. Esta unidad o conjunto de parasecuencias, no posee información de núcleos; sin embargo, se interpreta un sistema de sedimentación continental ya que al tope de la secuencia aparecen capas de carbón identificadas por los perfiles de densidad y porosidad neutrón y muestras de canal de los pozos perforados en el campo. Los escasos cuerpos de areniscas de este conjunto, también muestran alta discontinuidad lateral, a juzgar por las correlaciones hechas por RODRÍGUEZ (2012).

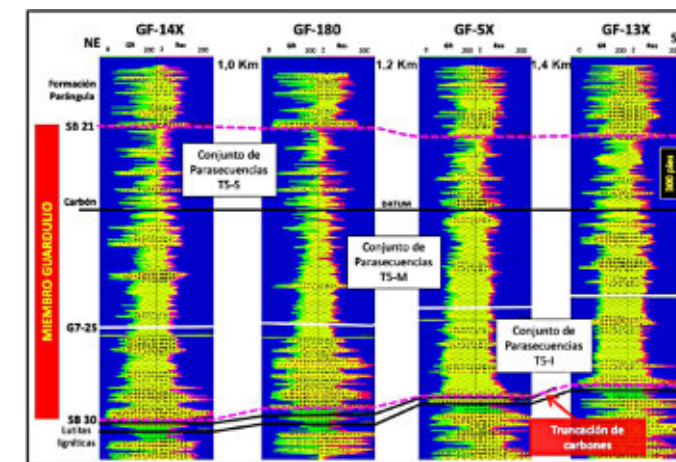


Figura 11. Subdivisión del conjunto apilado de parasecuencias. Se observa además el truncamiento de las lutitas ligníticas o carbonosas, por efecto de la discordancia SB-30. Modificado de RODRIGUEZ et al. (2013).

Conjunto de parasecuencias T5-S

Este conjunto está limitado en su base por el carbón usado como datum de correlación en la sección de la Figura 12, y en su tope por la discordancia SB-21. Los espesores se muestran bastante constantes en toda el área de estudio; sin embargo, existe cierto grado de

variación, ocasionado por la erosión asociada al evento SB-21 en el tope. La respuesta de los perfiles de pozos es significativamente diferente a los conjuntos infrayacentes, ya que las lutitas son notablemente más radiactivas y más conductivas, pudiendo interpretarse como la respuesta a un mayor contenido de materia orgánica en la unidad. Se interpreta también un sistema de sedimentación continental dado la presencia de carbones. La tendencia general del conjunto de parasecuencias es granodecreciente (Fig. 11).

CORTES SÍSMICOS PROPORCIONALES

VAIL et al. (1977a, 1977b) propuso que las reflexiones sísmicas primarias son generadas por superficies físicas en las rocas, consistiendo principalmente de superficies de estratificación con contrastes de velocidad-densidad. Por consiguiente, las reflexiones sísmicas siguen patrones de correlación cronoestratigráficas que, en condiciones normales, no pueden transgredir las líneas de tiempo. Mas tarde, TIPPER (1993), realizando análisis de sísmica sintética, demostró que en muchos casos se espera que las reflexiones sísmicas sigan los límites de las unidades litoestratigráficas, por lo que concluye que, en la mayoría de los casos, la premisa de que las reflexiones sísmicas siguen a estas superficies cronoestratigráficas, debe ser aplicado como primer principio de la interpretación sísmica. Por otra parte, HE y ZENG (2013) concluyeron que las reflexiones sísmicas no necesariamente siguen superficies cronoestratigráficas, pudiendo ser afectadas por la complejidad de las variaciones litológicas, aunque el concepto, en líneas generales, de que las reflexiones sísmicas siguen a las superficies cronoestratigráficas es correcto.

Asumiendo las premisas de VAIL et al. (1977a, 1977b), MIAL (2002), HE y ZENG (2013), el cartografiado de un evento sísmico debería entonces mostrar los rasgos morfológicos asociados a esa línea de tiempo geológico. Sin embargo, debido a que la facies sísmica T5-I (la unidad con mayor contenido arenoso dentro del Miembro Guardulio), presenta un carácter discontinuo, pareciera muy difícil realizar correlaciones de eventos sísmicos dentro de ella, por lo que, en lugar del método convencional, se tomaron dos reflectores primarios continuos como horizontes de referencia (si se quiere, líneas de tiempo), y se asume que todos los cortes proporcionales a estos dos horizontes deberían ser paralelos y por lo tanto representar líneas de tiempo. Esta metodología de cortes proporcionales y su aplicación, es explicada en detalle por ZENG (2010). Una

vez obtenidos los cortes sísmicos proporcionales, en el cubo 3D de Guafita, se procedió a analizarlos en detalle, a fin de integrarlos en la descripción e interpretación de los modelos de facies de cada una de las parasecuencias.

PARASECUENCIAS DENTRO DE T5I

El conjunto de parasecuencias T5-I contiene las unidades productoras del Miembro Guardulio en el campo Guafita, por lo cual cuenta con un buen número de perfiles de pozos y núcleos para su descripción, interpretación y correlación. Tradicionalmente los ciclos de cuarto orden han sido denominados parasecuencias (VAN WAGONER et al. 1988, 1990, POSAMENTIER y ALLEN 1999); sin embargo, en el área de estudio no se observaron evidencias de inundación marina en ninguno de los núcleos descritos; a pesar de ello en este trabajo, los ciclos sedimentarios aquí definidos internamente dentro de T5I son tratados como parasecuencias, por ser la unidad estratigráfica secuencial inmediatamente menor. Mediante la descripción detallada de los núcleos, su calibración y correlación con los perfiles de pozos existentes, se utilizaron los paleosuelos para delimitar estas unidades de cuarto orden o parasecuencias.

Los criterios utilizados para identificar estos paleosuelos (RETAILLACK 1988), y realizar las correlaciones fueron los siguientes:

(a) Madurez de los paleosuelos: se observó en los núcleos GF-26, GF-180 y GF-205X, que los niveles más maduros se ubican en los paleosuelos G7-3/4 y G7-2S, los cuales se caracterizaron por su intensa coloración roja y púrpura, mientras paleosuelos menos maduros como el G7-2I, mostraron colores grises verdosos con algunas leves coloraciones rojizas.

(b) Marcadores de baja resistividad: se calibraron los horizontes alterados pedogenéticamente con los perfiles de pozos, coincidiendo con marcadores litúlicos de muy baja resistividad.

Parasecuencia G7-3/4

Esta parasecuencia se caracteriza por tener la mayor relación arena-lutita, en la mayoría de los pozos, por lo que se define como una parasecuencia de alto grado de amalgamación vertical. La parasecuencia está limitada en su base por la superficie SB-30, y en su tope por el paleosuelo de G7-3/4. La madurez de este paleosuelo de G7-3/4 es claramente identificable en los núcleos de los pozos GF-26 y GF-205X como un horizonte de coloración roja y púrpura intenso.

De las correlaciones efectuadas y de los mapas de arena elaborados por RODRÍGUEZ (2012) se deduce que la geometría de estos cuerpos es de tipo mantos no confinados (sheet-bodies) con moderada a buena conectividad lateral y una tendencia vertical a la disminución del contenido arenoso. Estos cuerpos de areniscas pueden alcanzar hasta 50 pies de espesor con formas cilíndricas en el perfil de rayos gamma, y son interpretados como barras apiladas formando depósitos de canales complejos. La disminución de espesores a corta distancia entre pozos (menores a 200 m), dentro de los principales cinturones de canales, es otra característica notable derivada de la interpretación sedimentológica para estos canales meandriformes. En las imágenes de las amplitudes sísmicas (cortes sísmicos proporcionales), no fue posible definir tendencias o geoformas sedimentarias, posiblemente por el alto grado de amalgamación de las areniscas en esta unidad.

Parasecuencia G7-2I

Se encuentra limitada en su base por el paleosuelo G7-3/4 y en su tope por el paleosuelo G7-2I. Este último fue reconocido y correlacionado en los núcleos de los pozos GF-180 y GF-205X, tomando en cuenta sus características de madurez y relación estratigráfica. Este paleosuelo se caracteriza por una coloración moteada de gris verdoso, amarillo-marrón y rojo, lo cual corresponde a un nivel de madurez menor al observado en el paleosuelo de G7-3/4.

En la parasecuencia G7-2I, RODRÍGUEZ (2012) identifica en mapas, dos tendencias areales de cuerpos de areniscas en dirección NNO-SSE, sin embargo, el ancho de los canales parece disminuir en las imágenes de las amplitudes sísmicas (cortes sísmicos proporcionales), produciendo una geometría confinada tipo cintas alargadas (ribbon-bodies).

Parasecuencia G7-2M

Esta parasecuencia está limitada en su base por el paleosuelo de G7-2I y en su tope por el paleosuelo de G7-2M. El espesor de esta parasecuencia es mayor al de las parasecuencias infrayacentes hacia el sureste del campo Guafita, probablemente producto de una estabilidad del sistema fluvial. También la relación arena/lutita disminuye en relación a las secuencias infrayacentes, lo cual implica una parasecuencia con un bajo grado de amalgamación en las areniscas.

RODRÍGUEZ (2012) menciona que el mapa de arena neta de la parasecuencia G7-2M muestra un cambio en

la dirección de los cuerpos de areniscas en relación a las secuencias infrayacentes. La dirección de estos cuerpos es ahora N-S, manteniendo las geometrías alargadas y confinadas tipo cintas (ribbon-bodies). Este cambio en la dirección de sedimentación podría estar relacionado a algún leve basculamiento de la cuenca. Sin embargo, los cortes sísmicos proporcionales, obtenidos del cubo 3D, continúan mostrando una alta sinuosidad en los canales. SAEID et al. (2022), en un estudio de la Formación Carbonera en el piedemonte de la cuenca Los Llanos, usan análisis de descomposición espectral en el cubo sísmico 3D, e interpretan canales fluviales meandriformes de media a alta sinuosidad en los niveles C4 y C7, los cuales pudieran ser parcialmente equivalentes a la parasecuencia G7-2M.

Parasecuencia G7-2S

Esta parasecuencia está limitada por los paleosuelos G7-2M y G7-2S. El paleosuelo G7-2S es más desarrollado y maduro que los paleosuelos de los niveles estratigráficos inferiores. La relación arena/lutita es inferior con respecto a las secuencias infrayacentes, enfatizando el tipo de parasecuencia de muy bajo grado de amalgamación de las areniscas. RODRÍGUEZ (2012), indica que los principales cuerpos de arenosos de esta parasecuencia se encuentran desarrollados hacia el sureste del campo. Para el mismo autor, el mapa de arena neta de la parasecuencia G7-2S le permite observar una geometría alargada de los cinturones de canales confinados, también con dirección N-S. Los cortes sísmicos proporcionales de las anomalías de amplitud, continúan mostrando una alta sinuosidad de los canales. TORRADO et al. (2020) en un estudio sísmico efectuado en la Formación Carbonera, al norte de la cuenca Los Llanos (Colombia), observa (usando la técnica de time-slices en el cubo de amplitudes/coherencia), numerosos canales meandriformes de alta sinuosidad en el nivel denominado C3, el cual probablemente sea equivalente a la parasecuencia G7-2S de Guardulio.

MODELO ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL

La aplicación exitosa de la estratigrafía secuencial al registro de depósitos fluviales, es una tarea que ha evolucionado en las últimas décadas, y que comenzó en los años noventa con los trabajos de SHANLEY et al. (1992) y de WRIGHT y MARRIOTT (1993). Estos trabajos fueron refinados con mayor detalle en años subsiguientes por SHANLEY y McCABE (1994, 1998) y BOYD et al. (2000). Los modelos secuenciales todavía están vinculados al registro marino contemporáneo,

describiendo cambios en las facies fluviales y arquitectura dentro del contexto de cambios del nivel de base marino, usando la nomenclatura de sistemas encadenados convencionales (POSAMENTIER y VAIL 1988, POSAMENTIER y ALLEN 1999). Sin embargo, DAHLE et al. (1997) y MARTINSEN et al. (1999) presentaron una ruptura conceptual al definir un modelo estratigráfico secuencial “no convencional” donde los sistemas encadenados de baja y alta acomodación, están basados en la arquitectura aluvial, en el sentido de que estas unidades estratigráficas no marinas, son independientes de los cambios del nivel de base marino y no siempre están asociados a la migración de la línea de costa.

Por su parte, CATUNEANU (2017) definió que los patrones de apilamiento en entornos río arriba, se desarrollan más allá de la influencia de los cambios relativos en el nivel del mar/lago, como respuesta a la interacción de factores que modifican el equilibrio entre el suministro de sedimentos y el flujo de energía, es decir, espacio de acomodación, clima, tectonismo del área fuente y controles autocíclicos sobre los patrones de dispersión de sedimentos en varias escalas de tiempo. Por lo tanto, aguas arriba en la cuenca, los controles de los sistemas fluviales no coinciden con lo esperado de los modelos estratigráficos secuenciales convencionales (CATUNEANU 2006).

El grado de amalgamación de los canales es un elemento clave que siempre ha sido mencionado en la definición de patrones de apilamiento controlados aguas arriba en sistemas fluviales (BOYD et al. 2000, SHANLEY y McCABE 1994, 1998). Se sabe que la relación entre los elementos sedimentarios del canal y de la llanura de inundación, es el resultado de la interacción de tres procesos principales en los sistemas fluviales, como son: las tasas de agradación de la llanura aluvial, el grado de confinamiento del canal y la frecuencia de avulsión (CATUNEANU 2017).

Usando la nomenclatura de CATUNEANU (2017), este autor introduce formalmente dos términos basados en la descripción, pero a su vez, libres de los factores que podrían inducir o controlar los patrones de apilamiento. Estos patrones son denominados: Patrón de Apilamiento de Alta Amalgamación (High-Amalgamation Stacking Pattern - Channel-Dominated) y Patrón de Apilamiento de Baja Amalgamación (Low-Amalgamation Stacking Pattern - Floodplain-Dominated). Este patrón de apilamiento fue definido y

denominado anteriormente como de Alta Acomodación y Baja Acomodación respectivamente (SHANLEY y McCABE 1998, MARTINSEN et al. 1999), al suponer equivocadamente, que el predominio de los depósitos de las llanuras aluviales es producto únicamente de condiciones de acomodación. En realidad, la acomodación es sólo uno de los diversos controles de la sedimentación fluvial, y es por ello que CATUNEANU (2017), postula usar la nomenclatura no convencional de Alta Amalgamación y Baja Amalgamación como una descripción más precisa de los patrones de apilamiento en sucesiones continentales (Fig. 12), ya que además está desprovista del componente interpretativo, que en ocasiones puede ser erróneo.

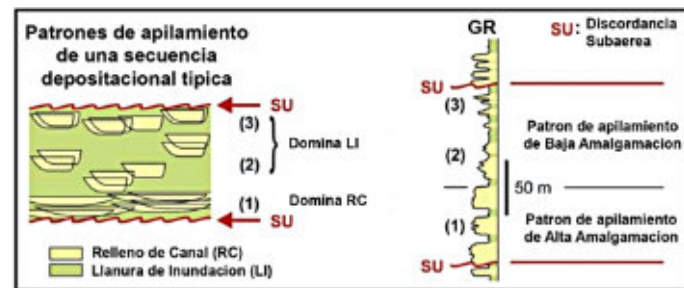


Figura 12. Arquitectura estratigráfica de una secuencia fluvial. El modelo ilustra una sucesión común de sistemas fluviales: (1) canales no confinados de alta energía, acumulados en condiciones de bajas tasas de agradación de las llanuras aluviales; (2) canales confinados y llanuras de inundación de baja energía, acumulados en condiciones de altas tasas de agradación de las llanuras de inundación; y (3) canales confinados y llanuras de inundación de baja energía, acumulados en condiciones de bajas tasas de agradación de las llanuras de inundación. La sección (3) incluye los sistemas fluviales de menor energía y tiene el potencial de preservación más bajo debido al desarrollo de la discordancia subaérea en la parte superior. Abreviaturas: SU Discordancia subaérea; GR Perfil de Rayos Gamma. Fuente: Modificado de CATUNEANU (2022).

A fin de establecer los sistemas encadenados, se prefirió utilizar la nomenclatura propuesta por CATUNEANU (2017), donde se define a cada sistema según su patrón de apilamiento característico en ambientes continentales (Fig. 12). Como se mencionó, este mismo autor propone dos tipos de sistemas encadenados basados en los patrones de apilamiento: uno denominado Patrón de Apilamiento de Alta Amalgamación o HAST (en inglés), dominado por sedimentación y amalgamación de arenas de canales; y otro denominado Patrón de Apilamiento de Baja Amalgamación o LAST (en inglés), dominado por la sedimentación de las arcillas de la llanura de

inundación. En este trabajo, se interpretó que, en líneas generales, el Miembro Guardulio en el área de estudio, se depositó lejos de la línea de costa, lo cual implica que la acomodación y amalgamación de las unidades sedimentarias, fue controlada en mayor medida por clima, tectonismo y controles autocíclicos. Es por ello que el uso de los conceptos explicados en los modelos secuenciales no convencionales de DAHLE et al. (1997) y CATUNEANU (2017), serán los aplicados para este estudio.

Sistemas Encadenados

El modelo de sistemas encadenados se aplicó basado en la nomenclatura propuesta por CATUNEANU (2017). Esto implica usar básicamente el grado de amalgamación de los canales fluviales como elemento totalmente descriptivo para definir la arquitectura fluvial. En los distintos tipos de patrones de apilamiento fluvial controlados aguas arriba, se pueden observar, a diferentes escalas, ordenes o frecuencias relacionadas con ciclos estratigráficos de diferentes magnitudes.

La relación entre los patrones de apilamiento de alta y baja amalgamación dentro de secuencias de orden inferior (cuarto orden) define a su vez el tipo de sistemas encadenado del orden superior (tercer orden). Por ejemplo, un conjunto con alternancia de unidades de cuarto orden donde se observen algunas unidades de baja amalgamación (Last), pero dominadas en su conjunto por unidades con un alto grado de apilamiento o amalgamación de canales (Hast), define como producto total un sistema encadenado de alta amalgamación de tercer orden (HAST). Por el contrario, un conjunto de unidades de cuarto orden dominadas por depósitos de llanuras aluviales con canales aislados, lo cual representa principalmente unidades de baja amalgamación (Last), define un sistema encadenado de baja amalgamación de tercer orden (LAST).

El Miembro Guardulio contiene al menos dos frecuencias superimpuestas, bien definidas en este estudio (Figs. 9 y 13). En primer lugar, las unidades de frecuencia inferior de tercer orden o conjunto de parasecuencias T5-I, T5-M y T5-S, que muestran una tendencia retrogradacional, es decir una disminución neta de la amalgamación hacia el tope. Un segundo grado de frecuencia sobreimpuesto, se observa por ejemplo en la unidad T5-I, la cual contiene a su vez e internamente, cuatro unidades de frecuencia superior de cuarto orden (G7-3/4, G7-2I, G7-2M y G7-2S) y que también son interpretadas en términos de sistemas

encadenados de cuarto orden. Finalmente, podría establecerse también un tercer grado de frecuencia sobreimpuesta en el Miembro Guardulio, lo que podría estar constituido por un conjunto de unidades mucho más pequeñas, definidas también por su grado de amalgamación, y que constituirían unidades de muy alta frecuencia interpretadas posiblemente como de quinto orden, pero cuya definición escapa del alcance de este estudio.

La base de T5I (base del Miembro Guardulio) está definida por la SB-30 (Figs. 8 y 11). Esta superficie marca claramente una disminución abrupta en la relación entre el espacio de acomodación y el aporte de sedimentos (A/S), generando como resultado un sistema encadenado de alta amalgamación (Hast). La distribución de los cinturones de canales sobre la superficie SB-30, sugiere que el espacio disponible de acomodación siempre fue relleno por arenas, ocasionando el amalgamamiento de los canales (sistema encadenado de alta amalgamación), y generando a su vez, una geometría tabular no confinada tipo mantos (sheet-bodies). Por lo tanto, en función de la distribución de los cinturones de meandros interpretados a partir de las imágenes de la sísmica 3D, y del grado de amalgamación observado en los núcleos de la unidad G7-3/4, contenida dentro del conjunto de parasecuencias T5I, la misma constituiría por definición un sistema encadenado de alta amalgamación (Hast) de cuarto orden (Fig. 13). Con respecto a la unidad G7-2I, la misma esta compuesta en gran parte de los pozos del campo por un alto grado de amalgamamiento, por lo que se clasifica como un sistema encadenado de alta amalgamación (Hast). Sin embargo, la proporción de areniscas es menor a la unidad infrayacente, marcando una tendencia a la disminución del tamaño de grano promedio a medida que las sucesiones se hacen mas jóvenes (RODRIGUEZ y CASAS 2025).

Por otra parte, las unidades estratigráficamente superiores G7-2M y G72S, dentro del ciclo basal HAST (T5I), representan unidades donde la relación fue positiva y mayor que en las unidades infrayacentes, generando cinturones de meandros separados verticalmente entre sí, y con geometrías confinadas tipo cinta (ribbon bodies). En conjunto, estas últimas unidades, constituirían sistemas encadenados de baja amalgamación (Last) y de alta frecuencia, interpretadas como de cuarto orden (Fig. 13).

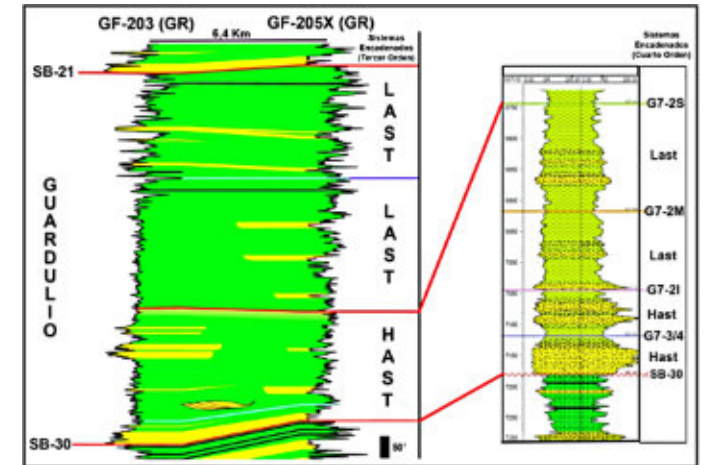


Figura 13. Límites de secuencia del Miembro Guardulio (SB-21 y SB-30). Definición de los sistemas encadenados: sistema encadenado de alta amalgamación (HAST) y sistema encadenado de baja amalgamación (LAST). Distribución vertical de sistemas encadenados de tercer orden, en las tres unidades del Miembro Guardulio, usando como ejemplo los pozos GF-203 y GF205X. También se muestran las unidades de 4to orden interpretadas, a la derecha de la figura. Leyenda: **HAST** (mayúsculas) representa el sistema encadenado de alta amalgamación de 3er orden (baja frecuencia), mientras que **last** (minúsculas) representa subdivisiones de 4to orden (alta frecuencia). Modificado de RODRIGUEZ et al. (2013).

EJEMPLO DEL MODELO DE FACIES INTEGRADO PARA LA PARASECUENCIA G7-2S

La integración de la información sedimentológica, perfiles de pozos y el cubo sísmico, permitieron elaborar un modelo refinado 3D de facies, para la unidad G7-2S. De la información de núcleos, se determinaron sucesiones de barras de meandros y abanicos de roturas embebidos en la llanura de inundación aluvial, con intervalos alterados pedogenéticamente. La calibración de los perfiles de pozos con los núcleos, permitió definir facies de perfiles, identificando y correlacionando los depósitos sedimentarios antes mencionados, dentro de un sistema encadenado de baja amalgamación de rango bajo (Last), que ha sido interpretado para esta parasecuencia.

Los rasgos morfológicos del sistema de sedimentación fueron revelados en los cortes sísmicos proporcionales efectuados en el cubo sísmico 3D. En la interpretación sedimentológica, el sistema sedimentario fluvial meandriforme se ratifica con dichos cortes sísmicos proporcionales. La Figura 14 muestra los rasgos morfológicos de los canales meandriformes, cuya dirección aparente del cinturón de canales es N-S. Los canales son cortados hacia el norte por la Falla

Guafita/Caño-Limón, y desaparecen hacia el sur en los límites de la adquisición sísmica. El ancho de los canales es de aproximadamente 100 m (curiosamente el promedio del ancho del río Arauca en el área de estudio). Otro rasgo característico de los sistemas fluviales meandriformes, observado en los cortes sísmicos, fue el estrangulamiento de canales (oxbow) como postula MIAL (1996), y que puede ser observado claramente en la parte superior derecha (interpretación sedimentológica) de la Figura 14.

Superponiendo las facies de perfiles sobre el mapa de amplitud sísmica en cortes proporcionales (stratal slices), se logró efectuar una interpretación de la posible distribución areal de los cuerpos que conforman la sedimentación de la parasecuencia G7-2S. Observando el modelo refinado de dicha parasecuencia, es evidente la complejidad del sistema sedimentario de canales meandriformes altamente sinuosos, depósitos de barras de meandros y abanicos de rotura, desarrollados dentro de la mencionada parasecuencia (Fig. 14).

TORRADO et al. (2020) en un estudio sismo/estratigráfico, al norte de la cuenca Los Llanos de Colombia, interpreta usando la técnica de time-slices aplicada al cubo de amplitudes/coherencia, numerosos canales meandriformes de alta sinuosidad, en los niveles denominados C1 a C3 de la Formación Carbonera, los cuales muy probablemente correspondan a la parte superior de Guardulio. Asimismo, SAEID et al. (2022), publican un estudio del modelo sedimentario de la Formación Carbonera en el piedemonte de la cuenca Los Llanos, donde usan análisis de descomposición espectral en el cubo sísmico 3D, para interpretar características sedimentológicas. Los mencionados autores, para los niveles C3, C4 y C7 de dicha formación, interpretan canales fluviales meandriformes de media a alta sinuosidad, similares a los observados en el presente estudio, aunque no es posible establecer una correlación precisa entre dichos niveles de la Formación Carbonera y las unidades definidas en el Miembro Guardulio.

La integración del modelado de asociación de facies y el cubo de amplitud sísmica permitió analizar de manera más integral la complejidad de algunos de los yacimientos de la unidad basal de Guardulio (G-7). Con toda esta información RODRÍGUEZ (2012), construyó un geomodelo, cuyo mallado de 10.704.344 celdas, incluyó como piloto únicamente la unidad o conjunto de

parasecuencias T5-I debido a que esta era la unidad estratigráfica que poseía mayor cantidad de información. El modelo de facies dentro de este geomodelo utilizó la interpretación sedimentológica previamente mencionada de canales, barras de meandro, abanicos de rotura, llanura de inundación y carbones.

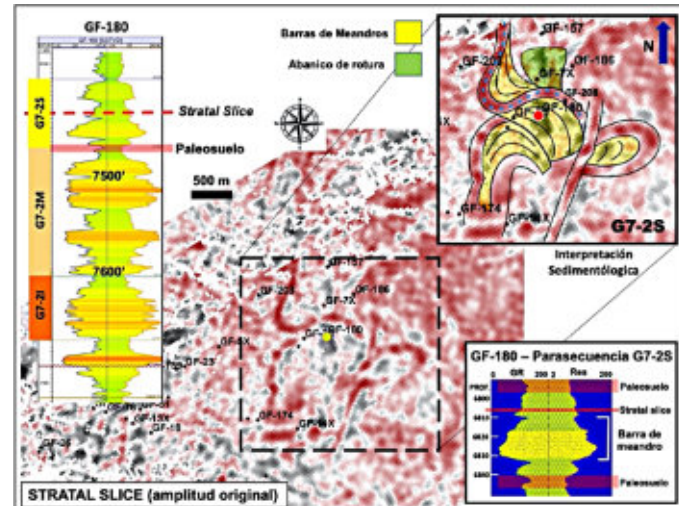


Figura 14. Integrando la interpretación de núcleos, perfiles de pozos y cortes proporcionales obtenidos de la sísmica 3D, se pueden deducir las relaciones laterales de los elementos del sistema sedimentario. Ejemplo de la identificación de barras de meandro, abanicos de rotura y canales abandonados, en un área alrededor del pozo GF-180 y en un nivel (stratal slice) dentro de la parasecuencia G7-2S. Fuente: Modificado de RODRÍGUEZ y CASAS (2025).

Como ejemplo de esta integración, la Figura 15 muestra una vista en perspectiva del área alrededor de los pozos GF-180 y GF-208, donde se puede comparar el modelado de facies generado dentro del geomodelo, y las amplitudes sísmicas negativas (aplicando opacidad) para la parasecuencia G7-2S. Queda en evidencia que la geometría de los cuerpos observados en la sísmica, confirman la interpretación de sistemas meandriformes para la unidad, que corresponden a un sistema de barras de meandros, limitados lateralmente por el último curso de canal, el cual probablemente al ser abandonado, fue relleno con facies arcillosas (amplitudes negativas de la sísmica).

El entendimiento de las dimensiones de los cuerpos sedimentarios, fundamentadas en los datos de núcleos, perfiles y sísmica 3D, permite realizar correlaciones más asertivas y confiables entre dichos cuerpos, así como de la estratigrafía en general, lo cual se traduce en una mejor comprensión del modelo estático y dinámico de los yacimientos de hidrocarburos en el Miembro

Guardulio. La aplicación de esta metodología de integración, ayudará a una mejor definición o adecuación de futuras actualizaciones en los planes de explotación. El uso del modelo integrado, también podría contribuir en la elaboración de esquemas de desarrollo utilizando métodos de recuperación secundaria que puedan ser implementados en etapas posteriores de la vida productiva del campo Guafita.

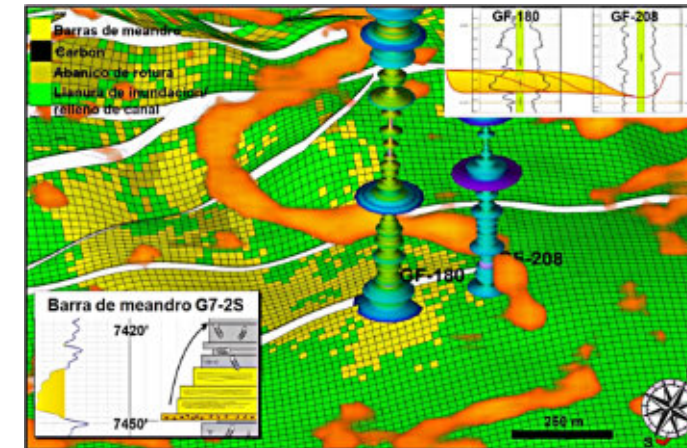


Figura 15. Vista en perspectiva de los pozos GF-180 y GF-208 integrando el modelado de facies (geomodelo) y el cubo de amplitud sísmica con opacidad de amplitudes positivas para la unidad G7-2S. La imagen en la esquina inferior izquierda muestra la descripción del núcleo y su correspondiente registro (GR), con el desarrollo de una barra de meandro. La imagen en la esquina superior derecha muestra la correlación interpretada entre los pozos GF-180 y GF-208, donde el primero atraviesa un cuerpo arenoso (celdas en amarillo en el geomodelo) interpretado como barras de meandro y el segundo pozo atraviesa depósitos lutíticos correspondientes al posible relleno y abandono del canal. Fuente: Modificado de RODRÍGUEZ y CASAS (2025).

CONCLUSIONES

Las características sedimentológicas observadas en las secciones de los núcleos de los pozos GF-26, GF-180 y GF-205X, correspondientes al Miembro Guardulio de la Formación Guafita, permitieron reconocer tres asociaciones de facies genéticamente relacionadas: relleno de canal/barra de meandro, abanico de rotura y llanura de inundación. Estas asociaciones de facies sugieren un sistema de sedimentación fluvial de tipo meandriforme para la unidad operacional G7.

Las principales superficies estratigráficas identificadas en núcleos y perfiles son: discordancias, paleosuelos y carbones. Las discordancias limitan el Miembro Guardulio en su tope y base, mientras que los paleosuelos y carbones definen la subdivisión interna.

Los paleosuelos identificados en núcleos pueden ser reconocidos como marcadores lutíticos de baja resistividad, los cuales constituyen superficies claves que pudieron ser correlacionadas para toda el área de estudio usando perfiles de pozos.

El Miembro Guardulio es una secuencia a escala sísmica de segundo orden con solapamiento expansivo en la base y truncamiento en el tope. Se reconocieron tres facies sísmicas o conjuntos de parasecuencias de tercer orden muy características, fueron reconocidas dentro de esta secuencia sísmica, y fueron denominadas de base a tope T5-I, T5M y T5-S.

La unidad T5-I, única analizada en detalle, se compone de cuatro parasecuencias de cuarto orden, denominadas de base a tope como G7-3/4, G7-2I, G7-2M y G7-2S, separadas por intervalos lutíticos alterados pedogenéticamente, que marcan superficies no depositacionales.

La aplicación de un modelo estratigráfico secuencial no convencional y totalmente descriptivo al Miembro Guardulio, posee grandes ventajas, ya que el análisis del grado de amalgamación por medio del nivel de base estratigráfico, indica ser la metodología más acertada, fácil de aplicar, y que por su carácter puramente descriptivo, puede ser replicada por otros autores.

Análisis de cortes proporcionales a posibles eventos sísmicos isócronos, permitieron identificar rasgos morfológicos asociados al ambiente de sedimentación fluvial meandriforme para la facies sísmica T5-I. Los canales meandriformes observados en dicha facies sísmica, muestran sinuosidades medias a altas.

La integración de información sedimentológica, perfiles de pozos, interpretación sísmica 3D, modelado de facies y el cubo de amplitud sísmica, permitieron elaborar un modelo de facies 3D refinado para la unidad operacional G7 del Miembro Guardulio en la Formación Guafita.

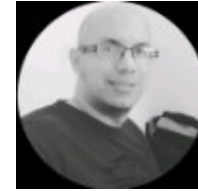
Resultados detallados como el descrito en este trabajo, permitirán ser aplicados a la comprensión del comportamiento estático y dinámico del Miembro Guardulio en el campo Guafita, con un impacto directo en la adecuación o mejora de los planes de explotación de hidrocarburos, incluyendo etapas futuras de recuperación secundaria.

REFERENCIAS

- ALLEN, J.R.L. 1970. Studies in fluvial sedimentation: a comparison of fining upward cyclothems, with special reference to coarse member composition and interpretation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40(1): 298–323.
<https://pubs.geoscienceworld.org/sepm/jsepm/article-abstract/40/1/298/96325/Studies-in-fluvial-sedimentation-a-comparison?redirectedFrom=fulltext>
- ARMINIO, J.F., YORIS, F., QUIJADA, C., LUGO, J.M., SHAW, D., KEEGAN, J.B. Y MARSHALL, J. 2013. Evidence for Precambrian stratigraphy in graben basins below the Eastern Llanos Foreland, Colombia. *AAPG International Conference and Exhibition*. Abstracts, 35 p. Cartagena.
https://www.researchgate.net/publication/352007167_Evidence_for_Precambrian_Stratigraphy_in_Gaben_Basins_below_the_Eastern_Llanos_Foreland_Colombia
- AUDEMARD, F.E. 1991. *Tectonics of Western of Venezuela*. PhD Thesis, Rice University, Texas, 245 pp + appendices.
- AZPIRITXAGA, I. y CASAS, J. E. 1989. Estudio Sedimentológico de las Formaciones Mirador y Carbonera en el río Lobaterita, Estado Táchira, Venezuela. *Geos, Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, 29: 1-17.
- BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., REYES-HARKER, A. & TORRES, V. 2007. Paleocene-Middle Miocene Flexural Margin Migration of the NonMarine Llanos Foreland Basin of Colombia. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(3): 51-70.
- BEHRENSMEYER, A. K. Y TAUXE, L. 1982. Isochronous fluvial systems in Miocene deposits of Northern Pakistan. *Sedimentology*, 29:331-352.
https://www.academia.edu/13001120/Isochronous_fluvial_systems_in_Miocene_deposits_of_Northern_Pakistan
- BERMÚDEZ, M. A., VAN DER BEEK, P. Y BERNET, M. 2010. Asynchronous Miocene-Pliocene exhumation of the central Venezuelan Andes. *Geology*, 39(2):139-142. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/39/2/139/130493/Asynchronous-Miocene-Pliocene-exhumation-of-the?redirectedFrom=fulltext>
- BERNAEZ, A. 2010. *Interpretación sísmica 3D estructural en el Campo Guafita, Edo. Apure, Venezuela*. Informe de pasantía no publicado. Universidad Simón Bolívar
- BRISTOW, J. D. 1986. *The geology of Guafita field Apure state, Venezuela. Informe Técnico Corpoven*. 30 pp.
- CANT, D. J. 1992. Subsurface facies analysis, in *Facies Models, Response to Sea Level Changes*, eds R. G. Walker and N. P. James, Geological Association of Canada, 27–45.
- CASAS, J. 2022. *Reporte geológico final del pozo Ripit-1, Arauca, Colombia*. Telpico Colombia, Reporte interno, 42 pp.
- CASAS, J., GONZALEZ M., y MARFISI, N. 2007. Interpretación de facies genéticas en pozos verticales/inclinados/horizontales y su integración en el modelo geológico. Formación Oficina, Campo Sincor, Bloque Junín, Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela. *IX Congreso Geológico Venezolano*. Caracas. Octubre 21-25.
- CATUNEANU, O. 2006. *Principles of sequence stratigraphy*. First edition, Elsevier. 375 pp.
- CATUNEANU, O. 2017. Sequence Stratigraphy: Guidelines for a Standard Methodology. *Stratigraphy and Timescales*, 2: 1-57.
<https://doi.org/10.1016/bs.sats.2017.07.003>
- CATUNEANU, O. 2022. *Principles of Sequence Stratigraphy*. Second edition, Elsevier, 486 pp.
- CHACIN, E., ESTEVES, A. y ANGEL, F. 2008. Búsqueda de hidrocarburos en la Formación Escandalosa del período Cretácico en el Campo Guafita, Cuenca de Barinas-Apure, Venezuela. *GeoTemas*, 10: 1505-1508.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9029152>
- CHALCO, A., GUEVARA, J. CHUNG, J. 1997. Paleosols as a correlation tool in the Maraón Basin. *Memorias del VI Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas*, Cartagena de Indias, Septiembre 14-17, Vol. 1, 187-192.
- CHIGNE, N. Y HERNÁNDEZ, L. 1993. Guafita Field-Venezuela, Barinas-Apure Basin, Apure State. *AAPG Special Volumes*, Volume TR: Structural Traps VIII: 231-253
- CLEVELAND, M. Y MOLINA, J. 1990. Deltaic reservoirs of the Caño Limón field, Colombia, South America in *Sandstone Petroleum Reservoirs*, Barwis, J., McPherson, J and Studlick, J. (eds), Springer-Verlag, 281-315.
- CORPOVEN 1985. Guafita 5X: El pozo más productivo descubierto en Apure. *Revista Corpovoz, Corpoven*, 3-5.
- DAHLE, K., FLESJA, K., TALBOT, M.R. AND DREYER, T. 1997. Correlation of fluvial deposits by the use of Sm-Nd isotope analysis and mapping of sedimentary architecture in the Escanilla Formation (Ainsa Basin, Spain) and the Staffjord Formation (Norwegian North Sea). Resumen, *Sixth International Conference on Fluvial Sedimentology*, Cape Town, South Africa, 46 p.
- DE LIMA, I., VASQUEZ, J., JOUVAL, J., PEREZ, A. y RESA, J. 2007. *Informe sedimentológico y bioestratigráfico del pozo GF-205X, Estado Apure, Venezuela*. Pdvs Reporte Interno, 37 p.
- DI GIACOMO, E. 1985. Acrítarcos de la Formación Carrizal, area de Zuata – Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela Oriental. *V Congreso Geológico Venezolano*, 503-529.
- FERNANDEZ, J. 2017. *Detailed study and evaluation of the oil potential from the Guadalupe formation: An oil field In Arauca, Colombia*. Universidad de Los Andes, Tesis no publicada, 40 pp.
- GONZALEZ DE JUANA, C. ITURRALDE, J. Y PICARD, X. 1980. *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas*. Ed. Foninves, Caracas, Tomo II: 415-420.
- HAMILTON, D. S. Y TADROS, N. Z. 1994. Utility of coal seams as genetic stratigraphic sequence boundaries in nonmarine basins: an example from the Gunnedah Basin, Australia. *AAPG Bulletin*, 78(2): 267-28

- HE, Y. Y ZENG, H. 2013. Chronostratigraphy at the seismic scale: Rethinking Vail *et al.*'s basic assumption. Paper presented at the 2013 *SEG Annual Meeting*, Houston, Texas, September. Paper Number: SEG-2013-0777
- HENAO, N. Y HERNÁNDEZ, M. 2006. *Modelo sedimentológico de los yacimientos G7-2 superior, medio e inferior Campo Guafita Sur, área Apure*. Trabajo de grado no publicado, Universidad de los Andes, 128 pp.
- HIGGS, R. 1997. Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: Discussion. *AAPG Bulletin*. 81(8): 1330-1331.
https://www.researchgate.net/publication/249896522_Basin_Development_and_Tectonic_History_of_the_Llanos_Basin_Eastern_Cordillera_and_Middle_Magdalena_Valley_Colombia_Discussion
- JARAMILLO, C., RUEDA, M., BAYONA, G., SANTOS, C., FLOREZ, P. Y PARRA, F. 2009. Biostratigraphy breaking paradigms: Dating the Mirador formation in the Llanos basin of Colombia. *SEPM Special Publication* 93: 29-40.
https://www.researchgate.net/publication/267637831_Biostratigraphy_Breaking_Paradigms_Dating_the_Mirador_Formation_in_the_Llanos_Basin_of_Colombia
- JASPE, J. 2004. *Generación de Modelos de Basamento de los Arcos de Arauca y Mérida en la Cuenca Barinas-Apure a través de integración de datos Geofísicos*. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Tesis de Grado no publicada, 127 pp.
- KISER, G. D. 1997. Notas geológicas sobre datos inéditos de Barinas, Apure y el frente de montañas. *Servigemin*, 18(31): 135-147.
- LOPEZ, L. y LO MONACO, S. 2011. Geoquímica de crudos de la sub-cuenca de Barinas, Venezuela. *Bol. Acad. Fis. Mat. Y Nat.* Vol. LXXI, 2: 9-27. <https://acfiman.org/wp-content/uploads/2023/03/bacfiman71.2.9.pdf>
- LUGO, J. Y MANN, P. 1995. Jurassic–Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin, Venezuela. *AAPG Memoir* 62. 699– 725 p.
- McCOLLOUGH, C.N. 1990. Caño Limón field, Llanos Basin, Colombia. In Structural traps II: Traps associated with tectonic faulting (treatise of Petroleum Geology Atlas of Oil and Gas fields. Beaumont, E. and Foster, M. (eds), *AAPG Special Volume* 65-93
- MARRIOTT, S. B., AND WRIGHT, V. P. 1993. Paleosols as indicators of geomorphic stability in two Old Red Sandstones alluvial suites, South Wales. *Journal of the Geological Society of London*, 150: 1109–1120.
<https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/gsjgs.150.6.1109>
- MARTINSEN, O., RYSETH, A., HELLAND-HANSEN, W., FLESCHE, H., TORKILSEND, G and IDIL, S. 1999. Stratigraphic base level and fluvial architecture: Ericson Sandstone (Campanian), Rock Springs Uplift, SW, Wyoming, USA. *Sedimentology*, 46: 235-259.
- MIALL, A. D. 2002. Architecture and sequence stratigraphy of Pleistocene fluvial systems in the Malay Basin, based on seismic time-slice analysis. *AAPG Bulletin*, 86(7): 1201–1216.
<https://pubs.geoscienceworld.org/aapg/aapgbull/article/86/7/1201/40000/Architecture-and-Sequence-Stratigraphy-of>
- MIALL, A. D. 1996. *The geology of fluvial deposits: Sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. 4ta ed. Berlin: Springer. 582 p.
- MIALL, A. D. 1992. Alluvial Deposits, In: Walker, R. G. y James, N. (eds.) *Facies Models*. GeoText1. 119 p.
- MITCHUM, R. M. Y VAN WAGONER, J. C. 1991. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. *Sedimentary Geology*, 70: 131–160.
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991SedG...70..131M/abstract>
- MITCHUM, R. M. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy. *AAPG Memoir* 26. 205–212 p.
- MOYA, E., ABUD, J. Y HERNÁNDEZ, J. 1989. Geological study of Guafita Field Reservoirs, Apure Basin, Southwestern Venezuela. AAPG Annual Convention, San Antonio, Texas [Resumen_en_linea]. Disponible: <<http://www.searchanddiscovery.com/abstracts/html/1989/annual/abstracts/0394b.htm>> (Consulta: 2024, Octubre 12).
- MULLER, J., DI GIACOMO, E. and VAN ERVE, A. 1987. A Palynological Zonation for the Cretaceous, Tertiary and Quaternary of Northern South America. *American Association of Stratigraphic Palynologists*, Contribution Series 19: 7-76.
- ORTEGA, J. F., VAN ERVE, A. Y DE MONROY, Z. 1987. Formación Guafita: Nueva unidad litoestratigráfica del Terciario en el subsuelo de la Cuenca Barinas-Apure, Venezuela Suroccidental. *Bol. Soc. Venez. Geol.*, 31: 9-35.
- OSTOS, M. Y YORIS, F. 1997. *WEC Evaluación de Pozos, Capítulo 1: Geología de Venezuela*, Schlumberger, 44 p.
- PARNAUD, F., GOU, Y., PASCUAL, J., CAPELLO, M., TRUSKOWSKI, I, PASSALACQUA, H. 1995. Stratigraphic synthesis of Western Venezuela: Petroleum basins of South America. *AAPG Memoir* 62. 681-698 p.
- PORTILLA, A. 2000. The Arauca, Mérida and El Baúl Arches in the Barinas-Apure Basin, Western Venezuela: New evidences related to their existence and importance in hydrocarbon exploration. *AAPG Annual Convention*, New Orleans, Louisiana. Abstract.
<https://www.searchanddiscovery.com/abstracts/html/2000/annual/abstracts/0534.htm>
- POSAMENTIER, H.W., ALLEN, G. P. 1999. *Siliciclastic sequence stratigraphy: concepts and applications*. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology, 7, 210 pp.
- POSAMENTIER, H.W., VAIL, P.R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition II sequence and systems tract models. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G. St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (eds.), Sea-level Changes: An Integrated Approach. *SEPM Special Publication*, 42: 125-154.
- RETALLACK, G. J. 1988. Field recognition of paleosols. *GSA Special Papers* 216: 1-19.
https://www.researchgate.net/publication/230891340_Field_recognition_of_paleosols

- RODRIGUEZ, E. 2012. *Estratigrafía secuencial del Miembro Guardulio, campo Guafita, Cuenca Barinas-Apure*. Universidad Central de Venezuela. Tesis de Maestría no publicada, 122 pp. <<https://acortar.link/kan4J9>>
- RODRIGUEZ, E., ANGEL, F. y CASAS, J. 2013. Modelado de Facies Fluviales en la Unidad Operacional G7, Campo Guafita Sur, Venezuela Suroccidental. *I Congreso Petrolero SPE-UNELLEZ* (Abstracts), 1-7.
- RODRIGUEZ, E. y CASAS, J. 2025. Integración Estratigráfica Secuencial del Miembro Guardulio (Formación Guafita), Mioceno Inferior, Campo Guafita, Apure, Venezuela. *Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat*, Caracas, 67: 11-30.
- SAEID, E., KENDALL, C., KELLOG, J., DE KEYSER, T., HAFIZ, I., ALBESHER, Z. y MARTINEZ, J. 2022. A depositional model for the Carbonera Formation, Llanos Foothills, Colombia, from workflow of a sequence stratigraphic framework and interpretation from well-log stacking patterns, well cuttings, and three-dimensional seismic spectral decomposition. *AAPG Bulletin*. 106(2): 321-353.
https://www.researchgate.net/publication/357579163_A_depositional_model_for_the_Carbonera_Formation_Llanos_Foothills_Colombia_from_workflow_of_a_sequence_stratigraphic_framework_and_interpretation_from_well_log_stacking_patterns_well_cuttings_and_thre
- SEPM STRATA, SEPM Stratigraphic Web 2024. Disponible en: <<http://www.sepmstrata.org/>> (Consulta: 2024, octubre 12)
- SHANLEY, K. W. y McCABE, P. J. 1994. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. *AAPG Bulletin*, 78:544–568. <https://archives.datapages.com/data/bulletins/1994-96/data/pg/0078/0004/0500/0544.htm?doi=10.1306%2FBDF9258-1718-11D7-8645000102C1865D>
- SHANLEY, K.W. AND McCABE, P.J. 1998. Relative role of eustasy, climate and tectonism in continental rocks: an introduction. In: Shanley, K.W. and McCabe, P.J. (Eds), Relative Role of Eustasy, Climate and Tectonism in Continental Rocks. *SEPM Special Publication*, iii.
- SHANLEY, K. W., MCCABE, P. J. Y HETTINGER, R. D. 1992. Significance of tidal influence in fluvial deposits for interpreting sequence stratigraphy. *Sedimentology*, 39(9): 905-930.
- SMITH, J., HASIOTIS, S., KRAUS, M. and WOODY, D. 2008. Naktodemasis Bowni: new ichnogenus and ichnospecies for adhesive meniscate burrows (AMB), and paleoenvironmental implications, Paleogene Willwood Formation, Bighorn Basin, Wyoming. *Journal of Paleontology*, 82(2): 267-278. <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-paleontology/article/abs/naktodemasis-bowni-new-ichnogenus-and-ichnospecies-for-adhesive-meniscate-burrows-amb-and-paleoenvironmental-implications-paleogene-willwood-formation-bighorn-basin-wyoming/276033A113EA49435482BFF1564E0A21>
- TIPPER, J. C. 1993. Do seismic reflections necessarily have chronostratigraphic significance?. *Geological Magazine*, 130(1): 47-55. <https://www.cambridge.org/core/journals/geological-magazine/article/abs/do-seismic-reflections-necessarily-have-chronostratigraphic-significance/7D6639A6A52171B6046438096BFE7A6C>
- TORRADO, L., CARVAJAL, L., MANN, P., BHATTACHARYA, J. 2020. Integrated seismic and well-log analysis for the exploration of stratigraphic traps in the Carbonera Formation, Llanos foreland basin of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*. 104: 1-27 https://www.researchgate.net/publication/340803317_Integrated_seismic_and_well-log_analysis_for_the_exploration_of_stratigraphic_traps_in_the_Carbonera_Formation_Llanos_foreland_basin_of_Colombia
- UJUETA, G. 1993. Arcos y lineamientos de dirección noroeste-sureste en las cuencas subandinas de Venezuela y Colombia. *Geología Colombiana*, 18: 95-106.
- VAIL, P.R., MITCHUM, R.M., JR., TODD, R.G., WIDMIER, J.M., THOMPSON, S., III., SANGREE, J.B., BUBB, J.N. AND HATLEILID, W.G., 1977a. Seismic Stratigraphy and global changes of sea level. In: C.E. Payton (Editor), Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration. *AAPG Memoir* 26: 49-212.
- VAIL, P. R., MITCHUM R.M. JR., and THOMPSON III, S. 1977b. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level: Part 3. Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap: Section 2. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation Memoir 26, 63-81
- VAN WAGONER, J. C., POSAMENTIER, H. W., MITCHUM, R. M., VAIL, P. R., SARG, J. F., LOUTIT, T. S., AND HARDENBOL, J. 1988. An overview of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A., and Van Wagoner, J. C. (Eds.), Sea Level Changes – An Integrated Approach. *SEPM Special Publication*. 42: 39-45.
- VAN WAGONER, J. C., MITCHUM, R. M., CAMPION, K. M. AND RAHMANIAN, V. D. 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, core, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. *AAPG Methods in Exploration Series* 7. 55 p.
- ZENG, H. 2010. Stratal slicing: Benefits and challenges. *The Leading Edge*, 29(9): 1040-1047. <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.3485764>



geoesdras@gmail.com

Esdras Rodriguez: Diez años de experiencia en interpretación sísmica, modelos geoestadísticos/sedimentológicos, caracterización de yacimientos y estudios integrados. Experto en aplicaciones de interpretación sísmica y el rol del intérprete sísmico en estudios que involucran atributos sísmicos post-apilamiento, AVO, estratigrafía de secuencias sísmicas, geomorfología sísmica e integración multidisciplinaria. Profesor de Geología Sedimentaria en la Escuela de Ingeniería de Petróleo de la Universidad Ezequiel Zamora (2008-2016). Instructor de los cursos de Interpretación de Registros de Pozos y Fundamentos de Petreles para empresas de O&G.



jcasas@geologist.com

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

Autor/Co-autor en 61 publicaciones para diferentes boletines y revistas técnicas, como: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, Geophysics, The Leading Edge, Asociación Paleontológica Argentina, Paleontology, Geos, Journal of Petroleum Geology, Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales de Venezuela y Caribbean Journal of Earth Sciences; incluyendo presentaciones en eventos técnicos como: AAPG, SPE, CSPG-SEPM y Congresos Geológicos en Venezuela y Colombia, así como artículos históricos de exploración petrolera en la revista Explorer. Autor de mas de 49 artículos de divulgación científica.

Profesor de Geología del Petróleo en la Universidad del Zulia (1991-1992) y Universidad Central de Venezuela (1996-2004). Profesor de materias de postgrado tales como: Estratigrafía Secuencial, Modelos de Facies y Análogos de afloramiento para la caracterización de yacimientos (2003-2023), en la Universidad Central de Venezuela. Mentor en 11 tesis de maestría. Representante Regional para la International Association of Sedimentologist (2020-2026) y ExDirector de Educación en la American Association of Petroleum Geologists (AAPG) para la región de Latinoamérica y del Caribe (2021-2023). Advisory Counselor para AAPG LACR (2023-2026).

**IMPORTANT CONTRIBUTIONS IN GEOSCIENCES
PROMISE TO REVOLUTIONIZE O&G&M EXPLORATION. No 2/6.**

EDINSON ALVAREZ1

1 Exploration Geologist, O&G&M Specialist,
Researcher of tectonic and structurally complex areas.



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 (Processing and Seismic Treatment Edinson Alvarez 2025): It requires specialized personnel, computer equipment and advanced software.

INTRODUCTION

The Sinú San Jacinto SSJ basin and the lower Magdalena Valley Basin, according to C-R Posada Saldarriaga et al. 2024, offer significant hydrocarbon prospectivity potential estimated for VIM at 3.18 tcf for Gas and 0.731 tcf Wet Gas, and a lower value than this range is estimated for SSJJ. According to ANH 2022, the values for Oil are 2,165 and 4,922 Mmboe respectively. Different studies by Explorasur-ANH 2012-2013, among others, report important surface sources of crude oil and gas, in addition to the existence of important O&G fields in the area.

The main objective of this report is to inform about the benefits of one of the CST tools – Edinson Alvarez2025, called EAST-P. In order to do so, the historical record of the geoscientific literature of Colombia is needed, to understand, comprehend and analyze the evolution over time of how the tectonic-structural interpretation of the areas of interest for this study has been, in this case the Sinú San Jacinto SSJ border basin. With this, contribute to the geoscientific knowledge of Colombia, without ignoring the valuable work, effort and dedication that the different authors have made, to in their time reach their important conclusions.

METODOLOGY

To overcome the structural and stratigraphic obstacles and difficulties posed by the tectonic and structural complexity of the area, the following activities are carried out:

- Compilation of information from oil exploration, geochemical, geophysical, geological, stratigraphic, tectonic-structural, and other studies in the study area.
- The results are compared with geoscientific publications on the tectonic and structural aspects of the sector, from 2003 to 2025, and with data contemporaneous with the date of this report.
- As part of the Author's independent professional activity, several integrated studies have been conducted to address the issue of seismic image resolution quality in the sector of interest.

RESULTS

1. Analysis of Geoscientific literature on structural tectonic interpretation of the Sinú San Jacinto fold belt. SSJFB.

Miryam Caro and Deborah Spratt. 2003.

Some regional and local studies have been completed in the Lower Magdalena Valley (mainly in the San Jorge and Plato basins), where there is oil and gas production from Tertiary reservoirs (Haffer, 1964; Duque-Caro, 1984; Gulf, 1983; Duque- Caro et al. 1987; Reyes and Camargo, 1995). However, a structural model and an understanding of the tectonic evolution of the San Jacinto Fold Belt do not exist. In addition, the relationship between the San Jacinto Fold Belt and its adjacent basins is not clear.

J. Kellogg , E. Toto , J. Ceron. 2005.

The seismic coverage shows several distinct patterns of reflectivity. The San Jacinto is characterized by a general absence of coherent seismic signals except for isolated sets of discontinuous dipping reflectors, as opposed to the fairly good reflectivity in the platform east of the RFZ. The seismic incoherence, relatively low density from gravity modeling,

Rossello, E.A.; Osorio, J.A.; López-Isaza, S. (2022). With notation of Barrero et al 2015.

El nivel actual de la actividad exploratoria en el MCC no ha permitido cuantificar el enorme potencial de los recursos hidrocarburíferos y la evolución tectosedimentaria de las secuencias vinculadas con la definición de los sistemas petrolíferos que contiene. Los pozos exploratorios y los datos sísmicos de reflexión de calidad son todavía limitados para permitir una evaluación rigurosa de las secuencias sedimentarias de hasta más de 6000 m (Barrero et al., 2015). Sin embargo, la información disponible ha podido demostrar la existencia de numerosos estilos de trampas estructurales y estratigráficas con gran potencial, y el diapirismo argilocinético ha comprobado la generación de hidrocarburos al exponerlos en superficie, permitiendo evaluar sus características geoquímicas (García-González et al., 2019; González-Morales et al., 2015).

J. A. Mora B. – Hocol 2021 (Ecopetrol Subsidiary).

The Lower Magdalena Valley & San Jacinto fold belt are two not very well-understood basins located in onshore NW Colombia, which were formed by the complex interaction of several tectonic plates and which contain commercial hydrocarbons.

The San Jacinto fold belt is frontier to emergent basin where Cretaceous to Eocene sequences are preserved and poorly understood (hypothetical to speculative) petroleum systems have been proposed.

Checa, J. ACGGP 2022.

En el primer aspecto, el reto es mejorar la calidad de los datos de subsuelo en áreas complejas como el Cinturón Plegado de San Jacinto o el piedemonte de los Llanos Orientales, donde existe un potencial enorme de yacimientos de gas con presencia de infraestructura cercana y mercados desarrollados, para reducir el riesgo exploratorio y promover recursos prospectivos a reservas en el menor tiempo posible. Se requiere una gran cantidad de información sísmica 3D para seguir desarrollando el potencial gasífero local.

Neil Hodgson, Karyna Rodriguez and Andres Mesa. 2023

Seismic imaging challenges

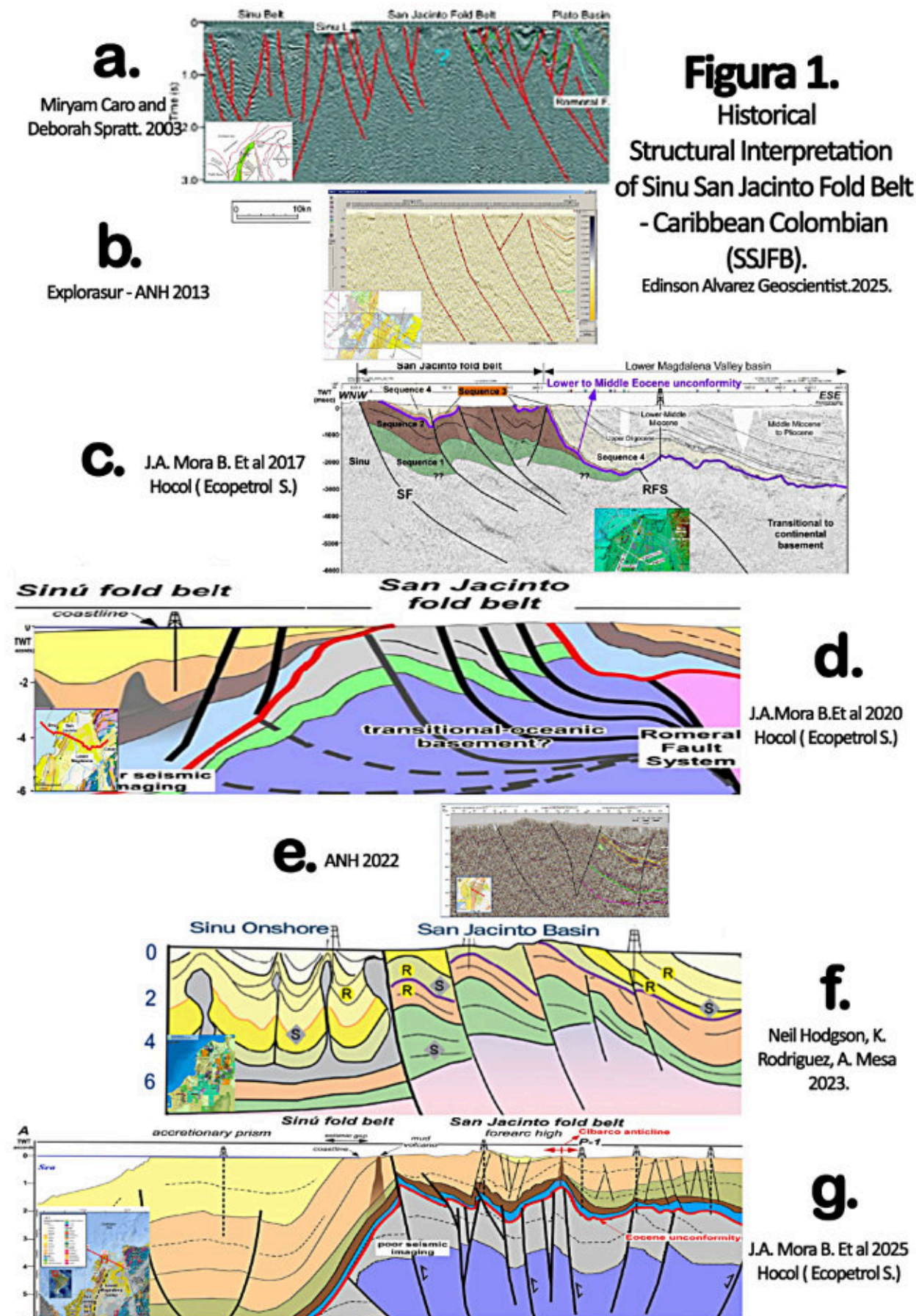
High structural complexity in the region inhibited early explorers working without seismic, yet the complexities of structure and geology has meant that the subsurface seismic images acquired to date have not generated much appetite for further exploration either. Some of the seismic imaging challenges faced in this project include rough topography resulting in statics both as near-surface refractors and subsurface events as well as making signal alignment difficult.

In the Sinu and San Jacinto basins, which represent some of the least explored areas onshore Colombia, the application of advanced algorithms to reprocess legacy seismic data are challenging the established hydrocarbon systems and their inherent geological models directly.

J. A. Mora B. Et al – Hocol 2025. (Ecopetrol Subsidiary).

Ortiz, 1995; Khameiss et al., 2023), among others. So far, the only commercial hydrocarbon production obtained in the whole San Jacinto fold belt comes from shallow marine, clastic middle Eocene reservoirs of the Chengue Formation in the Bullerengue Field (Mora et al., 2013; Sierra et al., 2024). Though Eocene carbonate facies have only yielded sub-commercial gas production in nearby wells, we consider that the Eocene calcareous and mixed lithologies still have an unrealized hydrocarbon potential in several areas of the SJFB. However, to reduce the exploration risk, we must increase our understanding of the elements and processes of the petroleum systems, focusing on the lateral and vertical variations of the facies and reservoir properties of the calcareous and mixed Chengue/Arroyo de Piedra Formation, which appear to be more complex than expected. Therefore, more detailed analyses must be carried out, including high-resolution sequence stratigraphy, to increase our understanding of the depositional environment, the controls of active faulting and the implications on hydrocarbon exploration and production. Possible reservoir compartmentalization, such as proposed

2. Historical Evolution of Structural Seismic Interpretation for the Sinú San Jacinto Fold Belt SSJFB Area, Years 2003 to 2025. (Figure 1.a,b,c,d,e,f,g. Images have been adjusted , focusing on the SSJFB area.)



DISCUSSION

It is very important to note the correspondence between what the authors cite in their studies and what is interpreted in their images, which is consistent. This is to clarify that despite the progress, even as of the date of this 2025 report, Hocol (a subsidiary of Ecopetrol) continues to face several uncertainties regarding the petroleum system, including the structural and stratigraphic complexity, the low resolution of seismic images, and a lack of understanding of some related issues. (Iosue Alejandro Mora-Bohorquez, Federico Moreno, Mauricio Ibanez, Luis Santamaría, Rigo Ramírez, Jhan Carlos Barbosa, Juan Diego Gongora, Daniel Sierra, Gabriel Veloza. 2025. Dating the Chengue/Arroyo de Piedra formation of the northern San Jacinto foldbelt: Results of the application of in situ U-Pb carbonate geochronology in NW Colombia. 19 p. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105355>)

It can also be seen in the historical record of structural interpretations for the Sinu San Jacinto Fold Belt SSJFB area (Fig 1.), that the structural pattern has remained almost the same, with one set of high-angle main faults dipping to the east (Figures 1. a, b, c, d, f.). The figures (1. e, g.) show two set of high-angle main faults dipping to the east and west. It is likely that there are more elaborate and complex structural interpretations unpublished, however, what was expressed by J. A. Mora B. Et al – Hocol 2025. (Ecopetrol Subsidiary). indicates that this stage of development has not yet arrived.

The SCT's EAST-P method has determined the existence of at least seven sets of fault patterns, six and five more than those shown and cited in the images by previous studies. All of these patterns are intertwined and continuous, giving the area both structural and stratigraphic complexity. (Under consultation, whether or not permission is required to publish images related to the topic).

It is important to highlight that its requires rigorous analysis to identify the best prospects and exploration opportunities in order to obtain the best possible results in the area. The structural aspect plays a very important role, which, according to authors, is complex for the Sinu San Jacinto Fold Belt SSJFB basin and somewhat less complex for the VIM lower Magdalena Valley. Added to this is the difficulty in obtaining seismic images with good quality information. **This latter aspect has also been overcome with SCT.**

A more detailed analysis and solution to problems of high structural and stratigraphic complexity can be consulted with the author of this article.

CONCLUSION

As previously mentioned, **Figures 1. a, b, c, d, e, f, and g** are the result of intensive and ongoing work to achieve a better understanding of the Sinú San Jacinto Fold Belt (SSJFB) in the northern Caribbean onshore region of Colombia. However, despite these advances, there are still significant uncertainties regarding the petroleum system, including structural and stratigraphic complexity, low seismic image resolution, and a lack of understanding of some related issues.

The Good News is that by applying the SCT EAST-P method, it is possible to answer most of the uncertainties and questions raised by Hocol 2025 Geoscientist team (Ecopetrol Subsidiary), by improving the quality of the seismic image, achieving a detailed tectonic-structural-stratigraphic interpretation (With a large quantity, orientation and arrangement of faults and geological structures, consistent with the faults mapped on the surface, which shows a complex character of the area, as has been stated. An important aspect totally absent in the interpretations made in previous years Figures 1a, b, c, d, e, f. g.), data that allow to define how the petroleum system is functioning, finding different types of structural, stratigraphic, mixed traps, as well as different amplitude anomalies that include Bright Spots, gas chimneys, and migration routes consistent with fluid accumulation and amplitude anomalies reported in the ANH report 2022. We have also managed to identify several prospects of varying size, some of them kilometers long and very thick. If confirmed through drilling, these prospects would significantly contribute to the country's energy sustainability and development. We could be talking about the largest O&G discovery not only in the Sinu San Jacinto Basin in the Colombian Caribbean onshore, but also nationally, meeting all the requirements for it. (Under consultation, whether or not permission is required to publish images related to the topic).

Further information on these aspects can be obtained directly from the author. Further details on this article may be found in a next edition. (Under consultation, whether or not permission is required to publish images related to the topic).

This methodology also applies to complex areas such as salt belts (pre-salt), the Gulf of Mexico, Gulf of America, Brazilian coast, African coast, the Mediterranean, the Alaska-Canada coast, Rocky Mountain ranges and foothills, Andes, Atlas, Himalayas, the Arabian Peninsula, among others, as well as to areas of low or minimal tectonic structural complexity. Also the increased production in complex fields, reconfirming and refining the geological and geomechanical models of fields that present this problem of double and even triple interpretations and models.

The SCT's EAST-P method was proposed to Ecopetrol in April 2024, for a value comparable to the transactions of large technology companies. This value logically exceeds the company's economic and financial capabilities, for this reason we invite to @Pötus, Forbes List ant Giants Companies to participate in this development.

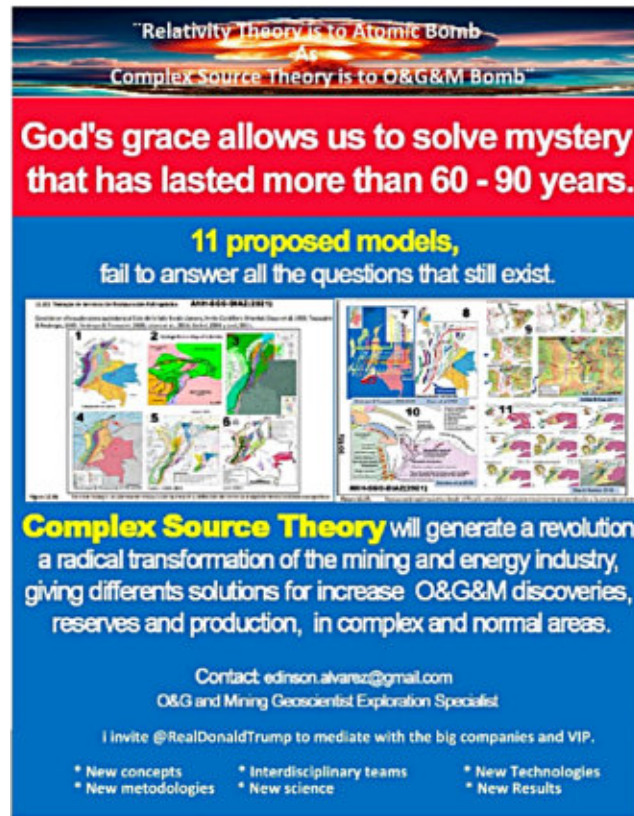
The technical support has deserved him recognition for his contributions to geoscientific knowledge of Colombia by important personalities and entities. (Maya journal of geosciences September edition 2025, pag. 154, Art-1/6), <https://revistamaya.com/wp-content/uploads/2025/08/Revista-Maya-Geociencias-Septiembre-2025.pdf>

REFERENCES

- Alejandro Mora-Hocol-Charla Youtube 2021, Formación y evolución del Valle Inferior del Magdalena y cuencas adyacentes. <https://www.youtube.com/watch?v=CN-Yb5epF9Y>
- ANH 2022. Assessment of Gas Prospectivity in Onshore Basins-47 p. https://www.anh.gov.co/documents/3693/Gas_prospectivity_in_onshore_basins_with_hyd_production_V1.pdf
- ANH 2022. Areas Advertisement Areas Advertisement. Repelón 2d Seismic Survey.21 P. https://www.anh.gov.co/documents/14084/REPELON_V2.pdf
- Bernal-Olaya, Rocio, Paul Mann, and Alejandro Escalona, 2015, Cenozoic Tectonostratigraphic Evolution of the Lower Magdalena Basin, Colombia: An Example of an Under- to Overfilled Forearc Basin, AAPG Memoir 108, 53 p. https://www.academia.edu/104512523/Cenozoic_tectonostratigraphic_evolution_of_the_Lower_Magdalena_Basin_Colombia_An_example_of_an_under_to_overfilled_forearc_basin
- B&G UNIÓN TEMPORAL- ANH 2006. Cartografía Geológica En Los Cinturones Plegados Sinú-SanJacinto.69P. https://www.anh.gov.co/documents/2727/CARTOGRAFIA_GEOLOGICA_SINU-SAN_JACINTO_2006.pdf
- C-R. Posada-Saldarriaga,Et al 2024. "Prospective Gas Resources with Emphasis on Wet Gas in Onshore Colombian Basins", Revista Facultad de Ingeniería, vol. 33, no. 69, 19p. https://www.researchgate.net/publication/392605665_Prospective_Gas_Resources_with_Emphasis_on_Wet_Gas_in_Onshore_Colombian_BasinsRecursos_prospectivos_de_gas_c_on_enfasis_en_gas_humedo_en_cuencas_colombianas_terrestres
- Eafit-ANH-2011. Geology And Hydrocarbon Potential Regional Geology Of Colombia-204p.
- Esteban Alfaro , Michael Holz. 2014. Review of the chronostratigraphic charts in the Sinú-San Jacinto basin based on new seismic stratigraphic interpretations. 31p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.004>
- Explorasur-ANH 2012-2013. Adquisición, Procesamiento E Interpretación De 308 Km De Líneas Sísmicas 2d En La Cuenca Sinú San Jacinto - Montes De María.47 P. <https://experience.arcgis.com/experience/b4cebb9e9f8743e5b0d75264121d93bc/>
- Hermann D. Bermúdez et al 2009. Estratigrafía Y Evolución Geológica De La Secuencia sedimentaria Del Cinturón Plegado De SanJacinto. 21p. https://www.anh.gov.co/documents/2810/Geol_Hermann_Dario_Bermudez_PDF.pdf
- IIES-ANH 2020. Integración geológica, sistemas petrolíferos y prospectividad de la Cuenca Urabá, Sinú San Jacinto y la Subcuenca San Jorge en el Valle Inferior del Magdalena. 318 p. <https://experience.arcgis.com/experience/b4cebb9e9f8743e5b0d75264121d93bc/>

- IIES-ANH-Colombian Round 2021. Geological Integration, Petroleum Systems And Prospectivity Of Colombia'S Frontier Basins: Lower Magdalena Valley – Plato Sub-Basin. 42p. https://www.anh.gov.co/documents/1148/2021-05-07-RondaColombia_2021-Lower-Magdalena-Valley.pdf
- IIES-ANH-Colombian Round 2021. Geological Integration, Petroleum Systems And Prospectivity Of Colombia ´ S Frontier Basins: Sinú San Jacinto And San Jorge (Lower Magdalena Valley). 33p. https://www.anh.gov.co/documents/1142/23-04-2021_Geological_Integration_SNSJ_SJ_V5_2021.pdf
- Jaime Checa-ACGGP-Adquisición de datos sísmicos en Colombia. 2022 178p. <https://www.acggp.org/libros/>
- Jose Osorno ,Antonio Rangel.2015.ANH-Halliburton. Geochemical assessment and petroleum systems in the Sinú-San Jacinto Basin, northwestern Colombia. 15p. https://www.academia.edu/19772412/Geochemical_assessment_and_petroleum_systems_in_the_Sin%C3%BA_San_Jacinto_Basin_northwestern_Colombia
- Juan Pablo Marín et al.2010. Evaluación Geológica Y Prospectividad Sector Sinú – Urabá. 9p. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/1013/3712>
- J. Kellogg , E. Toto , J. Ceron. 2005. Structure And Tectonics Of The Sinu-San Jacinto Accretionary Prism In Northern Colombia. X Congreso Colombiano de Geología, Bogota. 10p. <https://andeangeophysical.com/userfiles/file/Kellogg%20et%20al,%20%20X%20Congreso.pdf>
- Mapa de tierras ANH 2022-2025. <https://geovisor.anh.gov.co/tierras/>
- Mario García-González, Rocio Bernal-Olaya, Jorge L. Fuentes-Lorenzo, and Ana M García-Ceballos 2019. Mud Diapirs and Mud Volcanoes Associated with Gas Hydrates System in the Sinu Fold Belt of Colombia, South Western Caribbean and its Significant in the Petroleum System. Search and Discovery Article #80698 (2019) 29.p. https://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2019/80698garcia-gonzalez/ndx_garcia-gonzalez.pdf.html
- Miryam Caro and Deborah Spratt. 2003. Tectonic Evolution of the San Jacinto Fold Belt, NW Colombia. FOLD-FAULT RESEARCH PROJECT, UNIVERSITY OF CALGARY CSEG RECORDER. FEB 2003 | VOL. 28 NO. 02 | VIEW ISSUE. 12p. <https://csegrecorder.com/articles/view/tectonic-evolution-of-the-san-jacinto-fold-belt-nw-colombia>
- Mora, J. A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibáñez-Mejía, M., Faccenna, C., Veloza, G.,Mesa,A.(2017). Linking Late Cretaceous to Eocene tectonostratigraphy of the San Jacinto fold belt of NW Colombia with Caribbean Plateau collision and flat subduction. Tectonics, 36, 2599–2629. <https://doi.org/10.1002/2017TC004612> <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017TC004612>
- Mora, J. A. 2018 Upper Cretaceous to Recent plate tectonics, basin formation and tectonostratigraphy of the Lower Magdalena valley and San Jacinto fold belt of Northwestern Colombia: implications for hydrocarbon systems. department of Earth Sciences of the Free University of Berlin. Doctoral Thesis. 216 p. https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/22195/PhDThesis%20Mora_JosueAlejandro_June11_18%20online.pdf?sequence=1
- Mora, J. A., Onno Oncken, Eline Le Breton, Andrés Mora, Gabriel Veloza, Vickye Vélez, Mario de Freitas, 2018. Controls on forearc basin formation and evolution: Insights from Oligocene to Recent tectono-stratigraphy of the Lower Magdalena Valley basin of northwest Colombia. 23 p. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.06.032>

- https://www.academia.edu/42290634/Controls_on_forearc_basin_formation_and_evolution_Insights_from_Oligocene_to_Recent_tectono_stratigraphy_of_the_Lower_Magdalena_Valley_basin_of_northwest_Colombia?sm=b&rhid=34893879895
- Mora–Bohórquez, J.A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibáñez–Mejía, M., Veloza, G., Mora, A., Vélez, V. & De Freitas, M. 2020. Formation and evolution of the Lower Magdalena Valley Basin and San Jacinto fold belt of northwestern Colombia: Insights from Upper Cretaceous to recent tectono–stratigraphy. In: Gómez, J. & Mateus–Zabala, D. (editors), The Geology of Colombia, Volume 3 Paleogene – Neogene. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37, p. 21–66. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.02> <https://www2.sgc.gov.co/LibroGeologiaColombia/Paginas/v3ch2.aspx>
- Mora, J. A., Senior Exploration Geologist MSc. PhD. Hocol S.A. October 8, 2021. Origin, Evolution and Petroleum Systems of the Lower Magdalena and San Jacinto basins of NW Colombia.59p.https://www.anh.gov.co/documents/13512/2021.10.08-Origin_Evolution_PS_LMV_SJ_ANH.pdf
- Mora, J. A., L. Santamaría, G. Patarroyo, C. Gómez, M. Rueda, R. Ramírez, G. Veloza, M. Ibáñez, M. Cerón. 2021. Reconstruction of the evolution and infill of the Pliocene to early Pleistocene Tubará-Juan de Acosta Syncline, northern San Jacinto fold belt, NW Colombia & implications for hydrocarbons. 35p. https://www.anh.gov.co/documents/16798/Reconstruction_Tubara_JuanDeAcosta_Syncline_NWColombia_ImplicationsHCs.pdf
- Mora, J. A., Federico Moreno, Mauricio Ibanez, Luis Santamaría, Rigo Ramírez, Jhan Carlos Barbosa, Juan Diego Gongora, Daniel Sierra, Gabriel Veloza. 2025. Dating the Chengue/Arroyo de Piedra formation of the northern San Jacinto foldbelt: Results of the application of in situ U-Pb carbonate geochronology in NW Colombia. 19 p. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105355>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981125000173>
- Neil Hodgson, Karyna Rodriguez and Andres Mesa. 2023. Revealing new exploration potential onshore Colombia. 7p. Searcher Geodata UK LTD & Rob Yorke, AGT Published at: Geoexpro March 6, 2023. <https://geoexpro.com/revealing-new-exploration-potential-onshore-colombia/>
- Reyes, H. et al 2004. Tectonoestratigrafía Y Evolución Geológica Del Valle Inferior Del Magdalena. Ecopetrol, Instituto Colombiano del Petróleo. 18p. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/910>
- Rossello, E.A.; Osorio, J.A.; López-Isaza, S. (2022). El diapirismo argilocinético del Margen Caribeño Colombiano: una revisión de sus condicionantes sedimentarios aplicados a la exploración de hidrocarburos. Boletín de Geología, 44(1), 15-48. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n1-2022001> <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/12933>
- SGC 2014. Anexo K Compilación De La Cuenca Sinú – San Jacinto 43p. <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/Resultados.aspx?k=BusquedaPredefinida=DGBGeolPI100K>



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.

Análisis Multi-Atributo Evolutivo (EMAA): una aplicación en la caracterización de yacimientos de aguas profundas del Golfo de México.

Ernesto G. López Briceño¹ (PEMEX / Gerencia de Estudios Geofísicos), Agustín H. Domínguez Mendoza² (PEMEX / Activo de Exploración Marina Sur) Dámaso F. Contreras Tébar² (PEMEX / Grupo Multidisciplinario de Líderes de Disciplina y Especialidad")

* A solicitud de nuestros lectores, estamos publicando este artículo de nuevo.

Resumen

Se presenta la metodología de Análisis Multi-Atributo Evolutivo (EMAA; por sus siglas en inglés), el algoritmo y su implementación en la caracterización de yacimientos de aguas profundas del Golfo de México. EMMA es un robusto algoritmo evolutivo (AE) que utiliza un proceso de optimización natural (evolución biológica) para predecir propiedades petrofísicas de yacimientos con atributos elásticos. Para esto, se establece un modelo estadístico de predicción entre las propiedades elásticas del medio y la propiedad petrofísica de interés o registro objetivo (R_o). Posteriormente, se aplica el modelo al dato sísmico 3D para obtener volúmenes de propiedades petrofísicas (porosidad, volumen de arcilla, etc.) que pueden usarse como variables secundarias en el poblado geoestadístico y agregar valor a los productos generados con inversión sísmica. El diseño de EMMA se realizó con programación evolutiva (PE), el cual es un poderoso algoritmo de optimización global para la búsqueda de atributos elásticos en el espacio n-dimensional y su posterior integración en una gran cantidad de modelos estadísticos multivariados, hasta seleccionar el que presente el mayor coeficiente de correlación absoluto con el R_o . Para ilustrar la técnica se presentan los resultados obtenidos con datos libres de la Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG) y con datos autorizados de Pemex Exploración y Producción (PEP). Luego, se comparan los resultados con los obtenidos a través de búsquedas exhaustivas, demostrando que EMMA arroja resultados equivalentes e incluso mejores, pero en un tiempo computacional significativamente menor. Finalmente, se presentan ejemplos de su aplicación en aguas profundas del Golfo de México.

Introducción

El análisis sísmico multiatributo es un método que se ha aplicado exitosamente en la industria de Exploración y Producción (E&P), particularmente en la caracterización de yacimientos. Algunos ejemplos de estos estudios son los de Chopra y Pruden (2003), Calderon y Castagna (2007) y Sukmono (2007). Este método se basa en derivar modelos estadísticos multivariados de predicción, combinando registros geofísicos de pozo con datos sísmicos 3D. Numerosas metodologías han sido desarrolladas utilizando diferentes modelos de predicción, donde las regresiones (lineales y no lineales), estimadores geoestadísticos y redes neuronales artificiales son los tres métodos más comunes (Chambers y Yarush, 2002). De manera general, el análisis multiatributo puede dividirse en dos puntos fundamentales: 1) el diseño de los operadores de predicción y 2) la aplicación al volumen sísmico. El primer punto es crucial y depende del modelo de predicción empleado, de la cantidad de variables y, sobre todo, de la selección de atributos. El segundo punto consiste en aplicar el modelo de predicción al dato sísmico para obtener un volumen de propiedades petrofísicas. La

principal dificultad radica en encontrar la mejor combinación de atributos que logren reproducir el R_o . Desde un enfoque de optimización, este problema es altamente complejo y multidimensional, donde existen miles, o en ocasiones millones de combinaciones de atributos posibles que pueden ser evaluados, lo que se le conoce como espacio de soluciones o búsqueda. Además, otro factor que incrementa la complejidad del problema es que distintas combinaciones de atributos originan respuestas similares o numéricamente iguales (no-unicidad). Para dar solución a este problema, algunos autores como Álvarez et al. (2015) utilizan una búsqueda exhaustiva de atributos. Sin embargo, esto implica alto costo computacional y no es factible para modelos de predicción con más de tres atributos. Otros autores como Hampson et al. (2001) prefieren usar búsquedas locales, las cuales dan buenas soluciones, pero no necesariamente las óptimas. La desventaja de estas estrategias de búsqueda es que requieren de un análisis adicional por parte del especialista para la toma de decisiones y, por ende, incrementa el tiempo de respuesta. Por tal motivo, es preponderante diseñar nuevas estrategias de búsqueda automatizadas que permitan explorar el espacio de soluciones de manera eficiente y alcanzar la solución óptima.

En este trabajo se presenta el algoritmo EMAA, el cual se diseñó en el software de acceso libre Octave-4.2.0 (GUI). EMAA realiza una exploración inteligente en todo el espacio de soluciones, encontrando la solución óptima global o cercana a ésta con bajo costo computacional. La búsqueda es metaheurística, permitiéndole al algoritmo explorar y explotar eficientemente el espacio completo de soluciones. Con simulaciones de tipo Montecarlo se genera una población inicial de individuos (soluciones o modelos potenciales) representativos de todo el espacio de soluciones y mediante los operadores evolutivos de mutación genética y selección natural, se mejora la aptitud de la población (maximizar el grado de correlación entre los registros calculados a partir de ellos y el R_o), de modo que conforme avancen las generaciones (iteraciones), se alcance la solución óptima global. La función a optimizar consta principalmente de maximizar el coeficiente de correlación absoluto de Pearson $|r|$ entre el registro calculado y el R_o . Sin embargo, cuando existen múltiples pozos o restricciones adicionales, EMAA trabaja con optimización multi-objetivo. Los modelos estadísticos que utiliza el método para el diseño de los operadores de predicción son similares a los utilizados por Hampson et al. (2001) y Álvarez et al. (2015). La técnica, por tener características de los métodos de Montecarlo, hace posible que se logre explorar el espacio completo de soluciones de forma simultánea, reduciendo la probabilidad de quedar atrapado en un óptimo local. Además, por la inteligencia computacional que le añaden los operadores evolutivos, EMAA es capaz de enfocar la búsqueda en zonas prometedoras del espacio de soluciones. Lo anterior, le añade a esta estrategia de búsqueda una ventaja significativa sobre técnicas basadas en métodos determinísticos (Gallagher y Sambridge, 1994). La metodología se ha aplicado con éxito a datos sísmicos tridimensionales en aguas profundas del Golfo de México para predecir propiedades de yacimiento, en el modelado geoestadístico, la calibración de modelos de velocidad, inversión de datos electromagnéticos y generación de modelos de baja frecuencia para inversión sísmica.

Método y teoría

Planteamiento del problema de optimización

El objetivo de EMAA es predecir un volumen de propiedades petrofísicas usando atributos elásticos estimados con inversión sísmica. Para conseguir esto, se busca el máximo coeficiente de correlación absoluto $|r|$ entre el R_o y un registro calculado a partir de la combinación de un determinado número de atributos elásticos en modelos estadísticos multivariados. Debido a que los atributos elásticos difícilmente expondrán una relación lineal con el R_o , el método realiza una serie de transformaciones numéricas. En la tabla 1 se muestra un ejemplo de las transformaciones que se le aplican a los atributos elásticos, en donde cada número representa un atributo. Por ejemplo, el número 22 representa el atributo I_s .

Tabla 1.- Ejemplo de atributos elásticos y sus transformaciones.

	I_p	I_s	V_p/V_s	$\lambda\rho$	$\mu\rho$	λ/μ	σ	E_p	$K\rho$	PDF
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A^2	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$1/A$	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$1/A$	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$1/A^2$	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
$\log(A)$	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70

EMAA utiliza los modelos de regresión lineal múltiple (MLR; Hampson et al., 2001) y el esquema de rotación multiatributo (MARS; Álvarez et al., 2015). El modelo de MLR considera como variables independientes los atributos elásticos y como variable dependiente la propiedad petrofísica L de interés:

$$L = \beta_0 + \beta_1 A_1 + \beta_2 A_2 + \dots, \beta_N A_N \tag{1}$$

donde los coeficientes β_N se estiman mediante mínimos cuadrados para la combinación de N atributos. El modelo MARS se fundamenta en estimar en nuevo atributo τ en la dirección de máxima varianza de la propiedad petrofísica. Para el caso de dos y tres atributos está dado por:

$$\tau = A_1 S_1 \sin(\theta_i) + A_2 S_2 \cos(\theta_i) \quad (2)$$

$$\tau = [A_1 S_1 \sin(\theta_i) + A_2 S_2 \cos(\theta_i)] \sin(\varphi_j) + A_3 S_3 \cos(\varphi_j) \quad (3)$$

donde A_1 , A_2 y A_3 son los atributos elásticos, θ_i y φ_j son los ángulos de rotación y S_1 , S_2 y S_3 son factores de escala.

Posteriormente, se aplica el modelo lineal para obtener la propiedad petrofísica de interés:

$$y = m\tau + b \quad (4)$$

siendo m la pendiente del modelo y b la ordenada en el origen. El problema de optimización consiste entonces en determinar la combinación de atributos elásticos que logren maximizar el coeficiente de correlación absoluto $|r|$ entre el R_o y el registro calculado L o τ . El coeficiente de correlación es definido como:

$$r_{L,Ro} = \frac{\sigma_{LRo}}{\sigma_L \sigma_{Ro}} \quad (5)$$

donde σ_{LRo} es la covarianza de L y Ro , mientras que σ_L y σ_{Ro} son las desviaciones típicas de ambos. La ecuación 5 se aplica de igual manera para el caso de τ y el Ro . La función objetivo se define de la siguiente manera:

$$f(r) = |r_{L,Ro}| \quad (6)$$

El problema de optimización se resuelve entonces estimando el valor máximo de la función objetivo:

$$\begin{aligned} \max f(r) \\ 0 \leq |r| \leq 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Resolver la función objetivo es un problema complejo, debido a que existe una gran cantidad de posibles combinaciones de atributos elásticos que pueden ser evaluados. Por ejemplo, consideremos los datos de la tabla 1 para el caso más simple del modelo MARS (2 atributos y un ángulo). Existe un total de 70 atributos que pueden combinarse en pares. Con un muestreo fino de θ (0.1°) en un rango de -90° a 90° , el total de espacios que pueden evaluarse es de 4,349,415. Si ahora buscamos 3 atributos y 2 ángulos, el total de espacios es de 98,586,740. Una búsqueda exhaustiva en estos casos demanda alto costo computacional y no resulta factible para más de 3 atributos. Por ende, la implementación de una búsqueda meta-heurística mediante el algoritmo de PE que realiza EMAA es ideal para resolver el problema en un tiempo de cómputo razonable.

Proceso evolutivo

El proceso evolutivo consiste en individuos o modelos en una población que representan las posibles soluciones del problema. La población se somete a una evolución simulada en la cual cada iteración representa una generación. En cada generación, las soluciones relativamente buenas tienden a sobrevivir, mientras que las malas están más propensas a morir. Para diferenciar la calidad entre las diferentes soluciones, éstas se someten a un proceso de evaluación en la función objetivo, la cual juega el papel del ambiente. Se podría decir que, el proceso evolutivo ejercido en la población corresponde a una búsqueda a través de un espacio de soluciones potenciales (Michalewicz, 1996). A continuación se detalla el proceso evolutivo empleado por EMAA.

Representación del individuo: El individuo I o solución potencial contiene los parámetros del modelo estadístico f o genes del individuo. Para el caso del modelo MARS generalizado se define como:

$$I = f(A_{K,n}, \theta_{K-1,m}) \quad (8)$$

Donde A y θ son los atributos y ángulos, mientras que el subíndice K representa la dimensión del espacio de búsqueda, n el total de atributos elásticos y m el rango de ángulos. Note que la dimensión debe ser $K \geq 2$, m se encuentra en un rango de $-90^\circ, 90^\circ$ y n depende del total de atributos y sus transformaciones.

Población inicial: La población inicial P_i representa la primera generación de posibles soluciones al problema de optimización y se puede representar de forma matricial como:

$$P_i = \begin{bmatrix} I_{11} & \dots & I_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{N1} & \dots & I_{NM} \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde N representa el tamaño de la población y M los parámetros del modelo. El proceso estocástico empleado para generar la P_i consta de la generación de una secuencia de números aleatorios $r_1, r_2, \dots, r_N$ uniformemente distribuidos en un intervalo 0,1 para los M parámetros del modelo de los N individuos. Posteriormente, se emplean estas secuencias para producir el valor de cada parámetro para todos los individuos $I_{1M}, I_{2M}, \dots, I_{NM}$.

Mutación: La mutación es el operador de variabilidad y se encarga de generar hijos a partir de un pequeño cambio en la información genética de los padres. La estrategia de mutación que se aplica es variando solamente un gen del individuo, seleccionándolo a partir de la generación un número aleatorio $m1$ distribuido uniformemente en un intervalo $1, M$. Luego, se calcula la distancia euclidiana mínima L entre el gen seleccionado y los límites de su espacio de búsqueda, para posteriormente calcular un intervalo a, b de acuerdo a L y a un porcentaje de mutación σ , garantizando de esta manera que la mutación del gen no quedará fuera del espacio de búsqueda. EMAA realiza una doble mutación para hacer más eficiente la búsqueda de atributos y parámetros del modelo. Finalmente, se aplica la mutación dentro de un intervalo a, b para cada individuo de la Pi , formando así la población mutada PM :

$$PM = Pi + \sigma(a, b) \quad (10)$$

Evaluación: En el proceso de evaluación se medirá el valor de aptitud del individuo en el ambiente; es decir, la calidad de la solución. Éste consiste en evaluar ambas poblaciones (Pi y PM) en la función objetivo (ecuación 6). Cada individuo de las poblaciones poseerá entonces la nueva información de aptitud, que deberá agregarse a su información genética. Para el caso del modelo MARS generalizado, el individuo quedará representado como:

$$I = f(A_{K,n}, \theta_{K-1,m}, F) \quad (11)$$

donde F es el valor de aptitud o fitness, que en este caso está representado por el coeficiente de correlación absoluto obtenido por el individuo.

Selección: El operador de selección es el encargado de simular el proceso de competencia de los individuos; es decir, la supervivencia del más apto. La estrategia que sigue EMAA consiste en emular un torneo probabilístico, donde todos los individuos participan. El procedimiento consiste en agrupar ambas poblaciones en una matriz Ms :

$$Ms_{2N,M} = \begin{bmatrix} Pi_{N,M} \\ PM_{N,M} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Luego, se selecciona un individuo aleatorio de la matriz Ms . El individuo seleccionado compite contra todos los individuos de las poblaciones y agrega en su código genético el número de victorias conseguidas W .

$$I = f(A_{K,n}, \theta_{K-1,m}, F, W) \quad (13)$$

Lo anterior se repite $2N$ veces, de modo que los individuos de ambas poblaciones participan. Luego, se establece un tamaño de torneo T , que fungirá como el operador de presión en el torneo probabilístico. Finalmente, la población seleccionada PS es construida con el 50% de los individuos de la matriz Ms que consiguieron mayor número de victorias.

$$PS = Ms_{N,M} \quad (14)$$

Generaciones: Las generaciones representan el proceso iterativo del algoritmo y ayuda a mejorar la aptitud de la población. El número óptimo de generaciones puede establecerse a través de la experimentación o mediante una norma de convergencia. En este trabajo se determinaron a partir de experimentación, variando los operadores evolutivos, de modo que el tiempo de cómputo sea mínimo y el resultado satisfactorio.

Resultados y discusión

Para ilustrar el método se presentan resultados con datos de acceso libre de la SEG (2013), que constan de una serie de registros elásticos y evaluaciones petrofísicas. Luego, se hace una comparativa de los resultados obtenidos con EMAA y con una búsqueda exhaustiva, empleando los datos de la SEG y de PEP. Finalmente, se muestra un ejemplo aplicado en aguas profundas del Golfo de México.

Caso 1: Estimación de porosidad efectiva con el modelo MARS 2D

La estimación de ϕ_e con 2 atributos y 1 ángulo mediante el modelo MARS (ecuación 2) se realizó utilizando los datos de la SEG, con los cuales se derivó la tabla 1. EMAA se ejecutó con una población inicial Pi de 1000 individuos, un porcentaje de mutación inicial σ_i del 30% y final σ_f del 10%, un tamaño de torneo T de 10 en el proceso de selección y 100 generaciones. En la figura 1 se muestra un ejemplo de la ejecución y evolución del algoritmo, en donde se presentan una serie de gráficos cruzados en $\mathbb{R}^3$, en los que cada punto azul representa 1 individuo o solución potencial. En esta figura se observa que en la primera generación (Figura 1a) los individuos están dispersos en todo el espacio de soluciones, pero conforme avanzan las generaciones (Figura 1b - Figura 1f), los operadores evolutivos hacen que la población se agrupe en ciertas zonas. La agrupación de la población indica que los individuos están explorando en zonas prometedoras de la función objetivo (posiblemente máximos locales), hasta que eventualmente toda la

población se aglomera en la región donde se encuentra el máximo global, como se muestra en la figura 1f. En este punto, toda la población evolucionó, mejorando su aptitud al entorno, por lo que cualquier individuo puede ser empleado para solucionar nuestro problema y dará buenos resultados. Sin embargo, existe un individuo que sobresale en la población final, debido a la cantidad de victorias acumuladas durante el proceso de selección, el cual representa la mejor solución. En este caso, la mejor solución que determinó el algoritmo es la combinación del atributo $1/PDF$ y $1/I_p$, que corresponden al atributo número 50 y 31 de la tabla 1, respectivamente, con un ángulo de rotación de -65.47° . El coeficiente de correlación absoluto que posee este individuo es de 0.9037. En la figura 2a se observa este resultado, representado por un punto verde en el gráfico cruzado, mientras que en la figura 2b se muestra el gráfico del número de generaciones contra la aptitud del mejor individuo de cada generación, exhibiendo la convergencia del algoritmo. Finalmente, en la figura 3 se presentan los resultados obtenidos después de ejecutar EMAA y la comparación entre el R_o y la predicción. La figura 3a muestra la tabla de atributos elásticos considerados, en donde se observa en círculos rojos los atributos seleccionados. La figura 3b es una tabla de las variables estimadas por EMAA que conforman al individuo para el modelo MARS 2D (ecuación 2). Las figuras 3c y 3d son gráficos cruzados de los atributos $1/PDF$ y $1/I_p$ coloreados con el registro real y el predicho de ϕ_e , respectivamente. La figura 3e muestra la comparación entre el registro real (curva negra) y el predicho (curva roja) de ϕ_e , en donde se observa su alta similitud.

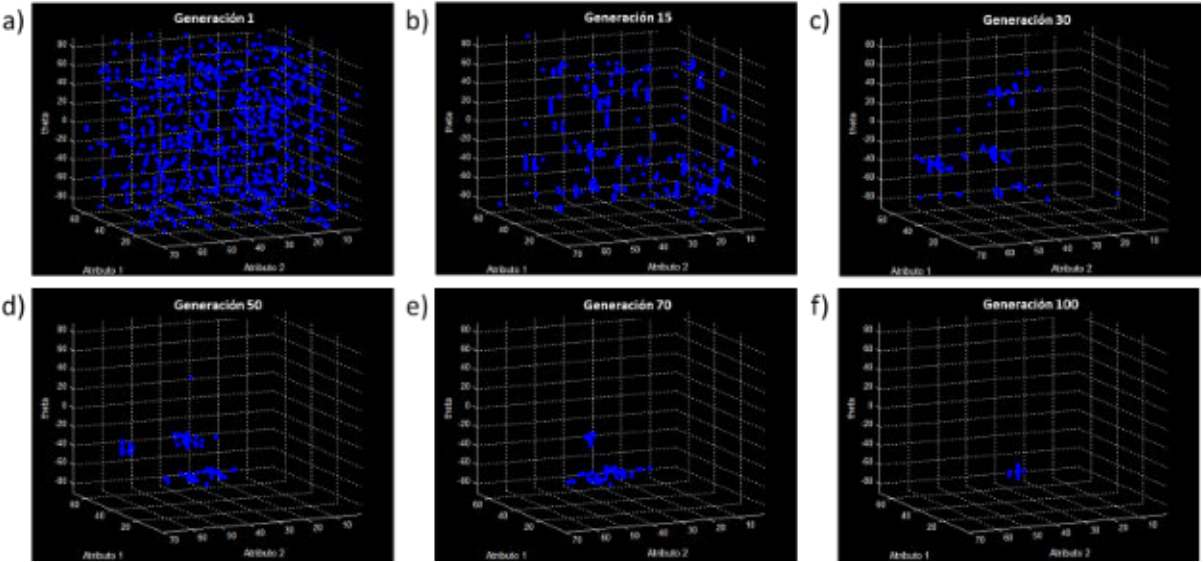


Figura 1.- Gráficos cruzados en $\mathbb{R}^3$ que muestran la ejecución de EMAA para la estimación de ϕ_e con 2 atributos y 1 ángulo. (a) Población inicial de individuos o primera generación. (b) Generación 15. (c) Generación 30. (d) Generación 50. (e) Generación 70. (f) Generación 100.

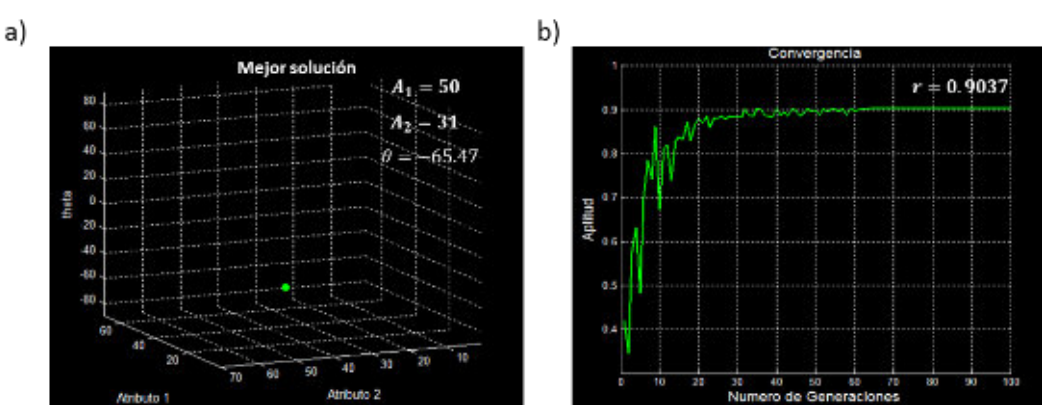


Figura 2.- Resultado final de la ejecución de EMAA para el modelo MARS 2D. (a) Representación de la mejor solución para este ejemplo. (b) Gráfico de convergencia.

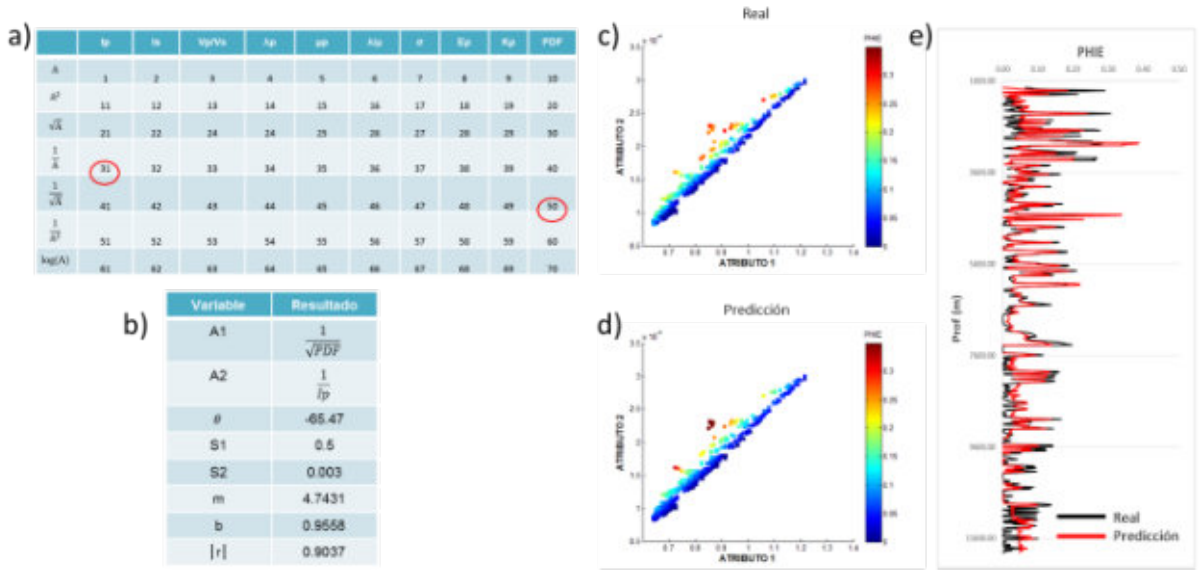


Figura 3.- (a) Tabla de atributos elásticos considerados en donde se observa encerrado en círculos rojos los atributos 50 y 31, que corresponden a $1/PDF$ y $1/I_p$, respectivamente. (b) Tabla de las variables del individuo estimadas para el modelo MARS 2D. (c y d) gráficos cruzados de los atributos seleccionados coloreados con el registro real y el predicho de ϕ_e . (e) Comparación entre el registro real y el predicho de ϕ_e .

Caso 2: Estimación de porosidad efectiva con el modelo MLR 3D

Para estimar la ϕ_e con 3 atributos usando el modelo MLR (ecuación 1), se ejecutó EMAA con los mismos parámetros que el ejemplo anterior. La mejor solución que determinó el algoritmo es un individuo que contiene la terna de atributos λ/μ , $\log(\lambda\rho)$ y $1/E\rho$, que corresponden a los atributos número 6, 64 y 38 de la tabla 1, respectivamente. El coeficiente de correlación absoluto de la solución es de 0.9185. La figura 4 muestra este resultado en el gráfico cruzado en $\mathbb{R}^3$ (Figura 4a) y el gráfico de convergencia (Figura 4b). En la figura 5 se muestran los atributos seleccionados en círculos rojos (Figura 5a), los resultados de las variables del individuo para el modelo MLR 3D (Figura 5b) y la comparación del R_o con la predicción después de ejecutar EMAA en forma de gráficos cruzados en $\mathbb{R}^3$ (Figuras 5c y 5d) y de registros (Figura 5e).

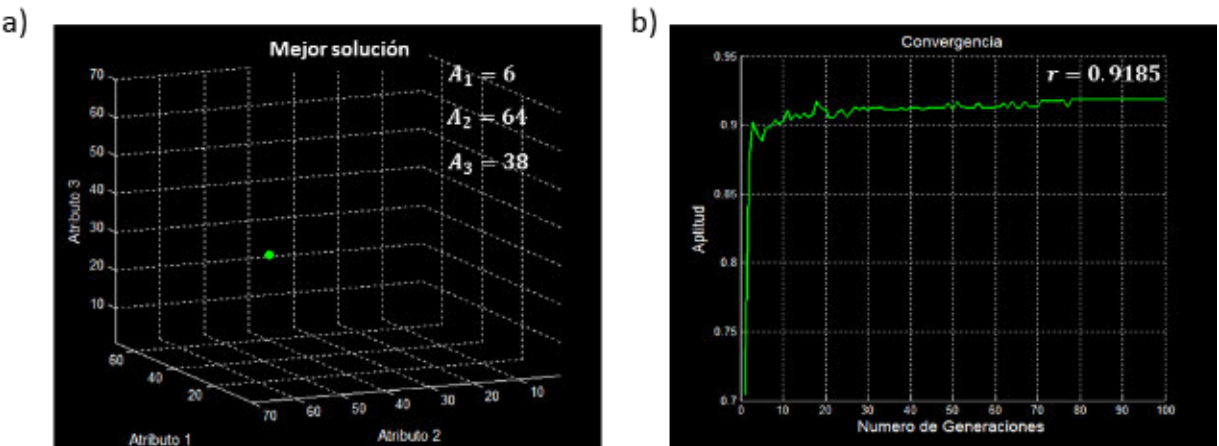


Figura 4.- Resultado final de la ejecución de EMAA para el modelo MLR 3D. (a) Representación de la mejor solución para este ejemplo. (b) Gráfico de convergencia.

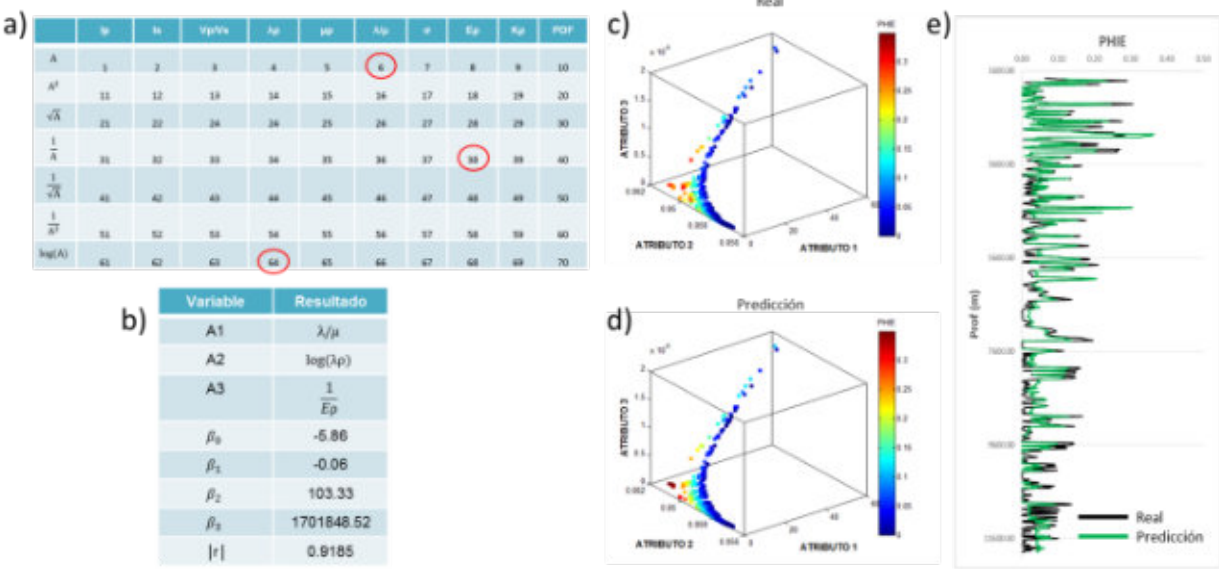


Figura 5.- (a) Tabla de atributos elásticos considerados en donde se observa encerrado en círculos rojos los atributos 6, 64 y 38, que corresponden a λ/μ , $\log(\lambda\rho)$ y $1/E\rho$, respectivamente. (b) Tabla de las variables del individuo estimadas para el modelo MLR 3D. (c y d) gráficos cruzados de los atributos seleccionados coloreados con el registro real y el predicho de ϕ_e . (e) Comparación entre el registro real y el predicho de ϕ_e .

Comparación de resultados

Para evaluar la eficiencia y precisión de EMAA, se compararon sus resultados con los obtenidos a partir de búsquedas exhaustivas, las cuales garantizan encontrar la solución óptima si la discretización del espacio de soluciones es fina. Se hará referencia a los resultados obtenidos con los datos libres de la SEG (2013) y datos de Pemex Exploración y Producción.

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos con los datos de la SEG para el modelo MARS 2D, 3D y 4D. Los resultados de EMAA se obtuvieron con los mismos parámetros mostrados en los dos casos anteriores (note que el caso 1 se incluye en la tabla 2). En esta tabla se observa que el tiempo de cómputo de EMAA es de 1.5 minutos en promedio, mientras que el tiempo de la búsqueda exhaustiva incrementa considerablemente al considerar mayor número de variables. Es de destacar que, para el caso 2D se realizó una búsqueda exhaustiva con una discretización fina para θ (cada 0.1°), obteniendo la solución óptima ($r=0.9037$). Se observa que EMAA también llegó al mismo resultado, pero en menor tiempo. Para el caso 3D, no es posible hacer una búsqueda tan fina, por lo que se discretizó el espacio de soluciones cada 5° para θ y φ , obteniendo un $r=0.9086$ en aproximadamente 46 horas, mientras que EMAA obtuvo un $r=0.9092$ en 60 segundos, por lo que se especula que este resultado es el óptimo global o se encuentra cercano a éste. Para el caso 4D se presenta solamente el resultado obtenido con EMAA, dado que no es factible aplicar una

búsqueda exhaustiva. En la tabla 3 se presentan los resultados para el modelo MLR 2D, 3D y 4D con los datos de la SEG (note que el caso 2 se incluye en la tabla 3). En este ejemplo, el tiempo computacional de la búsqueda exhaustiva es menor en comparación del modelo MARS, debido a que no incluye variables adicionales, enfocándose solamente a seleccionar los atributos y a la estimación de los pesos del modelo. Por ende, se tiene la certeza que los resultados obtenidos con esta búsqueda son las soluciones óptimas. En esta tabla se observa que ambas búsquedas dieron exactamente los mismos resultados, pero EMAA los obtuvo en menor tiempo, demostrando su eficiencia y precisión.

Tabla 2.- Comparación de resultados de EMAA contra la búsqueda exhaustiva para el modelo MARS (datos de la SEG).

Modelo MARS	2D		3D		4D	
	Tiempo (seg)	r	Tiempo (seg)	r	Tiempo (seg)	r
Búsqueda exhaustiva	3,720	0.9037	167,400	0.9086	-----	-----
EMAA	50	0.9037	60	0.9092	115	0.9243

Tabla 3.- Comparación de resultados de EMAA contra la búsqueda exhaustiva para el modelo MLR (datos de la SEG).

Modelo MLR	2D		3D		4D	
	Tiempo (seg)	r	Tiempo (seg)	r	Tiempo (seg)	r
Búsqueda exhaustiva	30	0.9037	1,480	0.9185	145,000	0.9251
EMAA	50	0.9037	60	0.9185	110	0.9251

Finalmente, en la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para el modelo MARS 2D, 3D y 4D, con información de aguas profundas del Golfo de México de PEP. Los datos constan de un total de 56 atributos elásticos, para estimar un volumen de saturación de agua Sw . El área posee una alta complejidad geológica, por lo que la información sísmica es de calidad mala a regular y los datos de los registros de pozos de calidad regular. Esto genera un espacio de soluciones altamente complejo, no lineal, con muchos óptimos locales y con características de no-unicidad. Por ende, fue necesario parametrizar el algoritmo de una manera más agresiva, con una población inicial Pi de 5000 individuos, un porcentaje de mutación inicial σi del 40% y final σf del 15%, un tamaño de torneo T de 5 y 100 generaciones. En esta tabla se observa que EMAA demora en promedio 10 minutos en obtener la solución, mientras que la búsqueda exhaustiva 1 hora para el caso 2D (θ cada 0.1°) y 6.5 días para el caso 3D (θ cada 2°).

Tabla 4.- Comparación de resultados de EMAA contra la búsqueda exhaustiva para el modelo MARS (datos de PEP).

Modelo MARS	2D		3D		4D	
	Tiempo (seg)	r	Tiempo (seg)	r	Tiempo (seg)	r
Búsqueda exhaustiva	3,900	0.8318	561,550	0.8312	-----	-----
EMAA	420	0.8318	600	0.8410	650	0.8478

Caso de estudio: aguas profundas del Golfo de México

En este caso, EMAA se utilizó para estimar volúmenes de Vcl , ϕe y Sw en dos yacimientos de aguas profundas del Golfo de México. En el área se cuenta con volúmenes de impedancia P Ip , impedancia S Is , densidad ρ , lambda-rho $\lambda\rho$, mu-rho $\mu\rho$, relación Vp/Vs y de Poisson RP , obtenidos mediante una inversión sísmica simultánea, con los cuales se derivaron un total de 49 atributos elásticos (tabla 5). EMAA se ejecutó empleando el modelo MLR 4D y la siguiente parametrización: $Pi=500$, $\sigma i=0.3$ $\sigma f=0.1$, $T=7$ y 100 generaciones.

Tabla 5.- Ejemplo de atributos elásticos y sus transformaciones.

	Ip	Is	ρ	$\lambda\rho$	$\mu\rho$	Vp/Vs	RP
A	1	2	3	4	5	6	7
$A2$	8	9	10	11	12	13	14
A	15	16	17	18	19	20	21
$1/A$	22	23	24	25	26	27	28
$1/A$	29	30	31	32	33	34	35
$1/A2$	36	37	38	39	40	41	42
$\log(A)$	43	44	45	46	47	48	49

Los resultados después de correr EMAA para los tres Ro se muestran en la figura 6. En esta figura se observan del lado izquierdo los gráficos de convergencia para cada propiedad petrofísica (Figura 6a, 6b y 6c) y del lado derecho (Figura 6d) el ajuste entre los registros reales (curvas negras) y los estimados (curvas rojas). Los modelos de predicción obtenidos alcanzaron coeficientes de correlación absolutos de de 0.84, 0.82 y 0.87 para Vcl , ϕe y Sw , respectivamente.

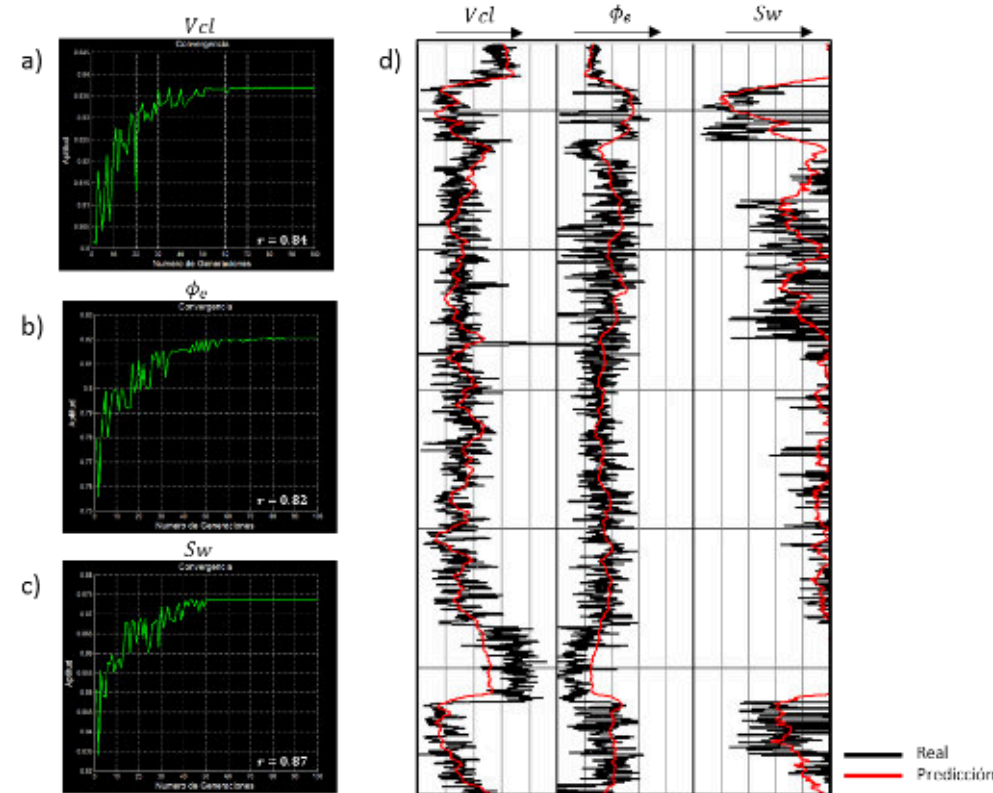


Figura 6.- (a) Gráfico de convergencia de V_{cl} . (b) Gráfico de convergencia de ϕ_e . (c) Gráfico de convergencia de Sw . (d) Comparación entre los registros reales (curvas negras) y los predichos (curvas rojas).

Finalmente, los modelos de predicción se aplicaron a los cubos de inversión para obtener los volúmenes de V_{cl} , ϕ_e y Sw . En la figura 7 se muestra una sección sobre cada volumen obtenido en la trayectoria del Pozo-01. En esta figura se observa la continuidad lateral de los yacimientos y la calidad del ajuste vertical con el registro de Sw . Del mismo modo, en la figura 8 se presentan mapas promedio del yacimiento 1 para cada volumen, en donde es posible interpretar su distribución espacial más probable.

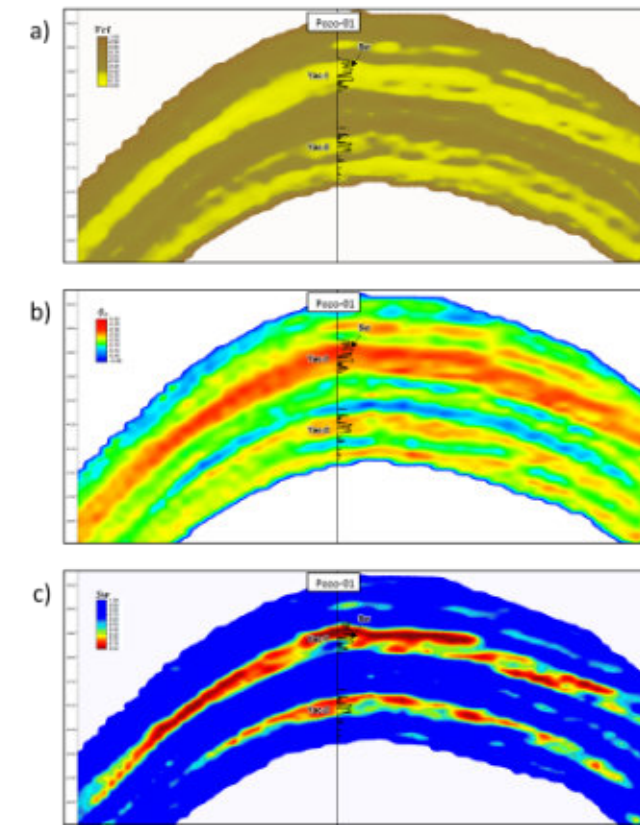


Figura 7.- Secciones sísmicas sobre la trayectoria del Pozo-01 en los volúmenes obtenidos de (a) V_{cl} , (b) ϕ_e y (c) Sw .

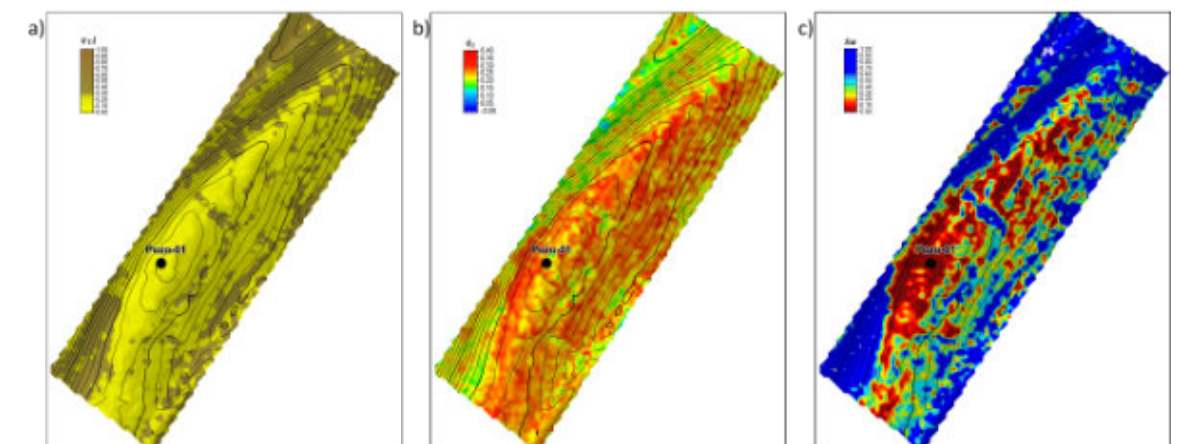


Figura 8.- Mapas de valores promedio de (a) V_{cl} , (b) ϕ_e y (c) Sw para el yacimiento 1.

Conclusiones

EMAA es un robusto algoritmo de optimización global bio-inspirado para predecir propiedades petrofísicas de yacimientos mediante una búsqueda metaheurística de atributos elásticos. La búsqueda, por estar basada en poblaciones de individuos, permite la exploración y explotación del espacio de soluciones de forma simultánea, haciéndola más eficiente y reduciendo la probabilidad de quedar atrapados en óptimos locales. En los casos de estudio presentados, el método obtuvo las soluciones óptimas previamente determinadas con búsquedas exhaustivas, pero en un tiempo significativamente menor. El método incluso obtuvo mejores soluciones que las búsquedas completas con una discretización no tan fina. El tiempo de cómputo es significativamente menor que los métodos de búsqueda exhaustivos debido al paralelismo intrínseco del método. Los modelos de predicción estimados deben aplicarse a los cubos de atributos elásticos para obtener volúmenes de propiedades petrofísicas, los cuales proveen una herramienta adicional para la interpretación sísmica cuantitativa, agregando valor a los productos de inversión sísmica y de física de rocas. Es importante tomar en cuenta que, para garantizar buenos resultados, los volúmenes de inversión deben ser de la más alta calidad y calibrar con los registros geofísicos. Los volúmenes de propiedades petrofísicas obtenidos pueden emplearse como variables secundarias en el modelado geoestadístico y apoyan en la reducción de la incertidumbre en caracterización y delimitación de yacimientos.

Referencias

- Álvarez, P., Bolívar F., Di Luca, M. y Salinas, T. (2015).** Multiattribute rotation scheme: A tool for reservoir property prediction from seismic inversion attributes. Interpretation, 3(4), SAE9-SAE18. doi: 10.1190/INT-2015-0029.1
- Calderon, J.E. y Castagna, J. (2007).** Porosity and lithologic estimation using rock physics and multi-attribute transforms in Balcon Field, Colombia.
- Chambers, R.L. y Yarus, J.M. (2002).** Quantitative Use of Seismic Attributes for Reservoir Characterization. Quantitative Geosciences, Inc. Broken Arrow, Ok, U.S.A* Houston, Texas, U.S.A.
- Chopra, S. y Pruden, D. (2003).** Multiattribute seismic analysis on AVO-derived parameters—A case study. The Leading Edge, 22(10), 998-1002. doi: 10.1190/1.1623640.
- Gallagher, K. y Sambridge, M. (1994).** Genetic Algorithms: A powerfull tool for large-scale non-linear optimization problems. Comput. & Geosci. 20(7/8), 1229- 1236.
- Hampson, D.P., Schuelke, J.S. y Quireor, J.A. (2001).** Use of multi attribute transforms to predict log properties from seismic data; Geophysics, vol-66, No1.
- Michalewicz, Z. (1996).** Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer, 387p.
- Society of Exploration Geophysicists, (2013).** License to seam open data. SEG Advanced Modeling Corporation 2013. Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
- Sukmono, S. (2007).** Application of multi attribute analysis in mapping lithology and porosity in the PematangSihapas groups of Central Sumatra Basin, Indonesia.

Software

- Octave-4.2.0 (GUI).** <https://www.gnu.org/software/octave>
- Petrel, 2016.** <https://www.software.slb.com/products/petrel>



Ernesto Guadalupe López Briceño

Ingeniero geofísico de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), titulado en 2011. **Maestro en Ciencias de la Tierra** por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), titulado en 2014 con Mención Honorífica. Su principal interés se centra en temas de geofísica, geoestadística, programación científica, métodos de optimización bioinspirados y aprendizaje automático aplicado a las geociencias. Posee publicaciones en foros y revistas técnicas de geofísica. Tiene 8.5 años de experiencia en la industria petrolera, desarrollándose principalmente en el área de procesos sísmicos especiales (AVO, inversión sísmica, etc.) en el **Activo de Exploración Aguas Profundas**. Ha participado en el desarrollo de modelos estocásticos para la evaluación económica de proyectos exploratorios en la **Gerencia de Programación y Evaluación** de la Subdirección de Exploración de Pemex. Actualmente pertenece a la **Gerencia de Estudios Geofísicos** de la Subdirección de Exploración, trabajando en la supervisión de proyectos de adquisición sísmica y colaborando en el desarrollo de algoritmos para procesamiento sísmico. ernesto.guadalupe.lopez@pemex.com <https://www.linkedin.com/in/ernesto-guadalupe-l%C3%B3pez-brice%C3%B1o-05422445/>



Dámaso Francisco Contreras Tébar

Ingeniero geofísico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 1983, con Maestría en Ciencias en la Universidad de Aberdeen, 2012. Laboró en el IMP (1988 a 1994) y en PEMEX en el Centro de Procesado de Datos Geofísicos en diferentes proyectos en Exploración enfocados a procesos sísmicos cuantitativos (AVO e Inversión Sísmica) y en la Gerencia de Aseguramiento Técnico y Aplicación de Tecnologías de Exploración. Actualmente es líder de la disciplina de Geociencias Aplicadas en la Subdirección Técnica de Exploración y Producción (STEP).

Agustín Heriberto Domínguez Mendoza

Ingeniero geofísico del Instituto Politécnico Nacional (IPN), egresado en 2001. Ha participado en proyectos de exploración en tierra y en aguas profundas del golfo de México enfocado en procesados sísmicos cuantitativos. Actualmente es líder del equipo de delimitación de campos y procesos sísmicos especiales en la sonda de Campeche.

ALGORITMOS ACOPLADOS DE FLUJO-TRANSPORTE CON DENSIDAD VARIABLE PARA INTRUSIÓN MARINA EN MEDIOS ANISOTRÓPICOS

Leslie F. MOLERO-LEÓN

INVERSIONES GAMMA, S.A.

E-mail: especialistaprincipal@gmail.com

ORCID 0000-0001-9667-3258

RESUMEN

La intrusión marina se ha descrito tradicionalmente como el contacto físico entre dos fluidos inmiscibles de distinta densidad (agua dulce y salada), separados por una interfaz nítida ("sharp interface") en medios isótropos y homogéneos. El problema hidrogeológico implica: a) definir la posición de la interfaz, b) cuantificar su avance horizontal ("intrusión") y vertical ("upconing"), y c) gestionar la captación de agua dulce sin promover la intrusión. La principal limitación de este enfoque clásico (basado en Ghyben-Herzberg) radica en que **no existe una interfaz definida, sino una zona de dispersión** de tamaño variable. Esta zona surge en escenarios de densidad dependiente, con geometrías complejas definidas por heterogeneidades y anisotropía del medio geológico. El artículo revisa desviaciones causadas por flujos verticales, anomalías en la posición predicha por Ghyben-Herzberg, heterogeneidades del acuífero y anisotropía en medios cársicos. El modelo conceptual considera flujo unidireccional uniforme (+x) de fluido de densidad variable en medios anisotrópicos, con dispersión en x e y, despreciando diferencias de viscosidad. La ecuación gobernante para

transporte de solutos es: $\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}$

PALABRAS CLAVE: acuífero costero, flujo de densidad variable, intrusión marina, Karst

ABSTRACT

Seawater intrusion has traditionally been described as the physical contact between two immiscible fluids of contrasting densities (freshwater and saltwater), separated by a **sharp interface** in isotropic, homogeneous media. The hydrogeological challenge involves: (a) defining the interface position; (b) quantifying its inland advance (*intrusion*) and vertical rise (*upconing*), and (c) managing freshwater extraction without exacerbating intrusion. The primary limitation of classical approaches (e.g., Ghyben-Herzberg principle) is the **absence of a distinct interface**, replaced instead by a **dispersion zone** of variable extent. This zone emerges in density-dependent flow scenarios within geometrically complex systems defined by geological heterogeneity and anisotropy. This review examines deviations induced by vertical flows, anomalies in Ghyben-Herzberg predictions, aquifer heterogeneity, and anisotropy in karst media. The conceptual model assumes unidirectional uniform flow (+x) of variable-density fluid in anisotropic media, with dispersion

in x and y, neglecting viscosity and density contrasts. The governing **solute transport equation** is:

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

KEY WORDS: coastal aquifer, Karst, seawater intrusion, variable density flux

INTRODUCCIÓN

Definir la posición de la interfase agua dulce-salada en los acuíferos cársicos litorales ha devenido un problema trascendental en los últimos años para diseñar las medias de mitigación al ascenso del nivel del mar como consecuencia del Cambio Climático. Pero no solo debido a ello. Combinado con el efecto de movimientos tectónicos de descenso del litoral, se añade un elemento extra que, aun con velocidades diferenciadas para uno u otro proceso, suman otro elemento al de la elevación neta del nivel del mar asociada a los posiciones proyectadas en los escenarios pronosticados.

Más aun, en el contexto del pronóstico de la posición de la intrusión marina se añaden sequías prolongadas con el consiguiente incremento en la explotación de las aguas subterráneas debidos al déficit de recarga natural que ellas ocasionan. Este incremento puede acentuar los abatimientos en las obras de captación (generalmente pozos verticales) y el crecimiento de los radios de influencia de las tomas de agua.

Soluciones socorridas y muy comunes, como profundizar los pozos para lograr una mayor penetración en el acuífero pueden traer como consecuencia la extracción de aguas de lenta recuperación (mayor tiempo de tránsito en el acuífero) y, entonces, conducir a una sobreexplotación de los sistemas acuíferos de agua subterránea produciéndose el minado del acuífero y el agotamiento sistemático de los recursos. Localmente pueden causar importantes desviaciones en las líneas de flujo que pueden producir efectos colaterales no deseados, como la atracción de aguas de menor calidad, el desplazamiento de divisorias (parteaguas) locales y hasta la individualización o segmentación de sistemas locales y muy locales de flujo.

En acuíferos cársicos, por razón de la heterogeneidad y la anisotropía del campo de propiedades físicas (palmer, 1999), el problema es aún mayor cuando se pretenden soluciones exactas al pronóstico de la posición de la interfase. La heterogeneidad produce un retroceso de la penetración de la cuña, mientras aumenta en el ancho y la pendiente de la zona de mezcla. La forma de la interfase y el flujo de agua salada son función de la distribución de las permeabilidades en cada realización. Sin embargo, los resultados de la penetración de la cuña y el ancho de la zona de mezcla no presentan grandes fluctuaciones. En caso de heterogeneidad moderada, ambas variables pueden ser reproducidas de forma satisfactoria por un medio homogéneo con dispersión local o efectiva (Abarca, 2006).

El problema está lejos de ser sencillo y ha sido abordado desde dos grandes aproximaciones: a) la hidrostática de Ghyben y Herzberg con modificaciones como la de Luszczinsky que considera ambos fluidos no miscibles separados por una interfase nítida (sharp interface); b) la dinámica, de Hubbert y Bear que, acompañadas de un esquema de intercambio de fluidos de densidad variable es la que representa el mundo real. Soluciones complementarias se encuentran en las interfases variadas de Glover, las soluciones exactas de Van der Veer y las complementarias de Vacher. En ambos casos, para ciertas condiciones de borde se aplica Dupuit-Forcheimer. Los trabajos de Bibby introduciendo modelos de doble porosidad constituyen un significativo aporte a la solución del problema.

Este artículo detalla aproximaciones analíticas simples basadas en la solución del problema de la posición (bidimensional) variable de la intrusión marina (flujo de fluidos con densidad variable cuya solución básica fue establecida por Cooper, 1959) en medios anisotrópicos de acuíferos cársicos libres costeros dominantes en Cuba y en muchos pequeños estados insulares. El refinamiento de un algoritmo adecuado estaría derivado de un algoritmo complejo que combina la Ecuación de Continuidad con las ecuaciones de flujo horizontal de Dupuit-Forcheimer y las de Ghyben-Herzberg-Luszczinsky y las modificaciones de Verruijt-Glover-Vacher para resolver la posición de la interfaz agua dulce-agua salada y su propagación tierra adentro en respuesta a alturas cambiantes del nivel del mar bajo diferentes modelos geológicos y geomorfológicos de acuíferos costeros.

El conjunto de algoritmos considera las desviaciones promovidas por la existencia de flujos verticales, las anomalías en la posición prevista por la Ecuación de Ghyben-Herzberg, la posición las no-homogeneidades del acuífero y la anisotropía del campo de propiedades físicas en el medio cársico. Se consdieran los resultados obtenidos en casos reales de acuíferos costeros ajustados con las interfases de Glover y las soluciones exactas de Van der Veer para acuíferos freáticos con interfases. Los gradientes verticales y las posiciones de las interfases en acuíferos multiestratificados definidos por niveles de cavernamiento no homogéneos, se resuelven mediante aproximaciones de dos tipos: exponenciales y polinómicas (Bear y Dagan, 1964a, 1964b; Bear y Buchlin, 1991; Bear, 1993; Bear, Tsang y De Marsily, 1993; Bear et al. 1999)

El flujo de fluidos con densidad variable en medios anisotrópicos –en progreso- se enfoca asumiendo flujo unidireccional, continuo y uniforme en la dirección +x, y la dispersión en ambas direcciones (x; y). Las diferencias de viscosidad y densidad entre otras entradas y el acuífero se consideran despreciables. Bajo estas condiciones la ecuación de gobierno para

geometrías dispersivas en dos dimensiones, se puede plantear una solución general del tipo $\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v \frac{\partial C}{\partial t}$

El problema del tratamiento de dominios de flujo de fluidos con densidad variable ha sido resumido por Hidalgo, Slooten y Carrera (2007) del modo siguiente “en problemas de flujo con densidad variable no existe un potencial del que se pueda derivar el flujo con una ley de tipo Fourier. La principal implicación es que, aunque se pueden dibujar líneas de igual presión o nivel equivalente de aguadulce, los mapas que resultan son poco informativos respecto de las direcciones de flujo. La ecuación de flujo expresa la conservación de masa de fluido. Si la densidad es constante, la conservación de masa es equivalente a la conservación de volumen, que es lo que expresa la ecuación de flujo que se resuelve habitualmente. Incluso si la densidad sólo depende de la presión, se puede llegar a expresiones análogas. Cuando la densidad depende de la concentración, sólo puede eliminarse de la ecuación cuando se hace la hipótesis de Boussinesq de que las isóneas de concentración son sub-paralelas al flujo. Esta hipótesis es razonablemente buena para flujo estacionario, pero no para transitorio. Por ello, parece más razonable no hacer ninguna simplificación y trabajar directamente con la forma original. Una segunda implicación de que la ecuación de flujo expresa la conservación de masa de fluido es que debe reconocer todos los términos de entrada y salida de masa”.

GENERALIDADES

La intrusión marina (no salina¹) es un estado de equilibrio derivado de la diferencia de densidad de dos fluidos miscibles que entran en contacto en los acuíferos litorales con movimiento en sentido contrario (Fig. 1): el agua terrestre que descarga en el mar (en acuíferos libres) o a cierta distancia del litoral (en acuíferos confinados y semiconfinados) y el agua marina (salina) que, en forma de cuña -vista en sección transversal- yace bajo ésta. Desde hace muchos años, la intrusión marina se reconoce como la primera causa de pérdida de calidad de las aguas subterráneas de Cuba (y en numerosos estados insulares carbonatados) y se reconoce en todo el país

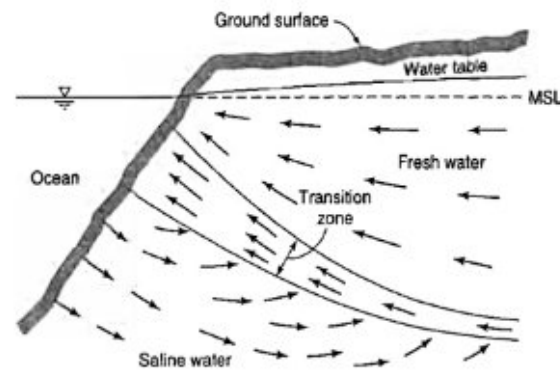


Fig. 1. Corte típico de la relación entre las aguas dulces terrestres y salinas marinas en un acuífero litoral (Molerio, 1994).

Ese equilibrio puede variar y de hecho varía en varias escalas de tiempo: a) diaria, con el fluctuar de la marea (Fig. 2) que incluso pueden variar la dirección del flujo subterráneo, la estructura del campo de propiedades físicas y los recursos disponibles a veces en intervalos muy breves de tiempo como, por ejemplo, entre mareas (Fig. 3); b) hasta semanal, asociada a las penetraciones del mar en eventos extraordinarios que eleven el nivel del mar (mareas de tormenta); c) a escala estacional o mayor, asociada a los periodos lluvioso, menos lluvioso, sequías estacionales, o al bombeo o -todas a la vez- que disminuyen la carga de agua dulce y reducen el flujo de las aguas subterráneas y superficiales de la tierra al mar; d) hiperanual por sequías recurrentes, incremento de explotación o ambas que provocan el mismo efecto de

¹ Una mala práctica derivada de la traducción “sea water intrusion” asociada a “saline water” confunde intrusión “marina” asociada al intercambio agua dulce-salada del mar en los acuíferos costeros con la intrusión salina que puede estar derivada de otras fuentes de mineralización de las aguas, como la fuga de aguas de capa de yacimientos gasopetrolíferos o la migración desde estructuras diapíricas. La intrusión “marina” es un caso particular de salinización de las aguas terrestres derivados de un intercambio debido exclusivamente entre las aguas de mar y las continentales.

reducción del volumen de flujo de descarga (y el incremento del volumen que penetra tierra adentro (Fig. 4) y e) a escala de tiempo geológico, habiéndose reconocido fluctuaciones del nivel del mar desde +120 hasta -110 m respecto al nivel del mar actual solo durante el Cuaternario (Fig. 5) en el Golfo de México y El Caribe (Molerio y Balado, 1989; Molerio y Flores, 1997).

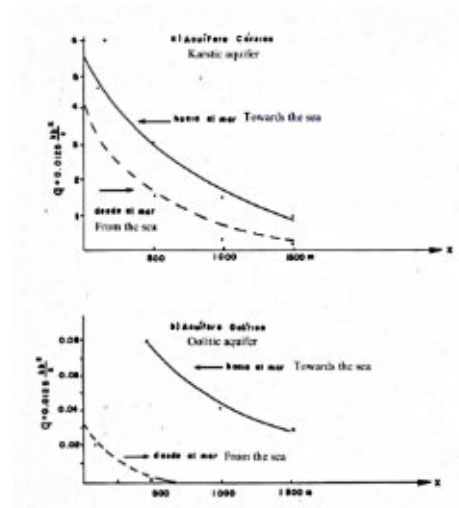


Fig. 2. Penetración de las mareas en el acuífero de Cayo Largo (Molerio, 1989).

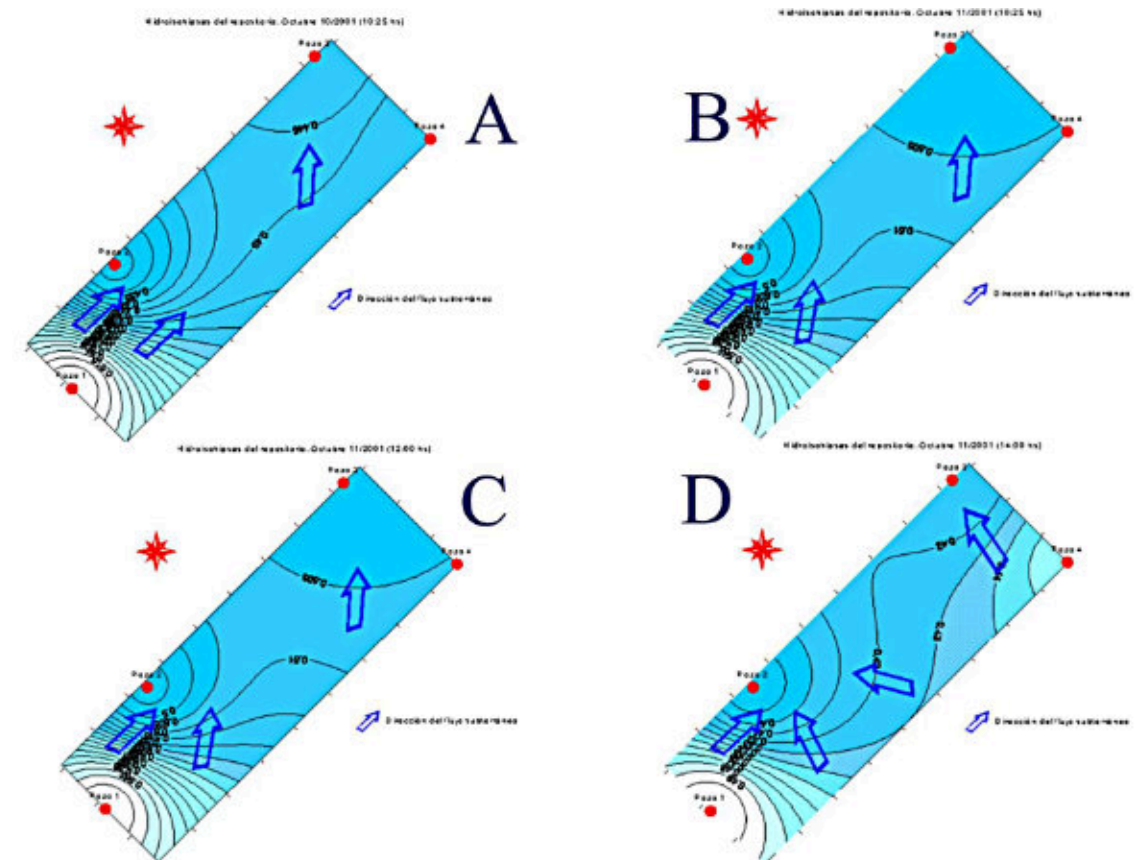


Fig. 3. Cambios en la dirección y gradiente de flujo como resultado de la penetración cíclica erra adentro de la marea en un acuífero cársico litoral (Molerio, 2006).

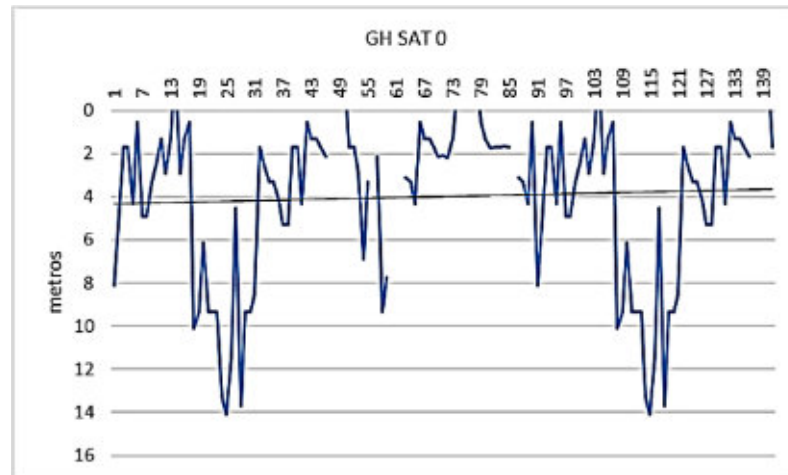


Fig. 4. Variación temporal (2003-2015) de la posición de la concentración de 1 g/L de TDS en una estación de monitoreo de intrusión marina en referencia a la altura media del nivel del mar.



Fig. 5. Amplitud de las posiciones extremas del nivel del mar Cuaternario en la región del Golfo de México y el Caribe (Molerio y Flores, 1997).

De igual modo, el nivel de las aguas terrestres puede aumentar y desplazar el equilibrio hacia el mar, como consecuencia de un aumento en la recarga natural o inducida, una disminución de las extracciones (o ambas), derivación de corrientes superficiales que desembocan en el mar, evaporación desde llanuras o humedales costeros en diferentes intervalos de tiempo o también un aumento de reurbanización, movimiento de tierras o cualquier obra civil o hidráulica que implique, de manera permanente o no, una variación de los caudales de descarga al mar

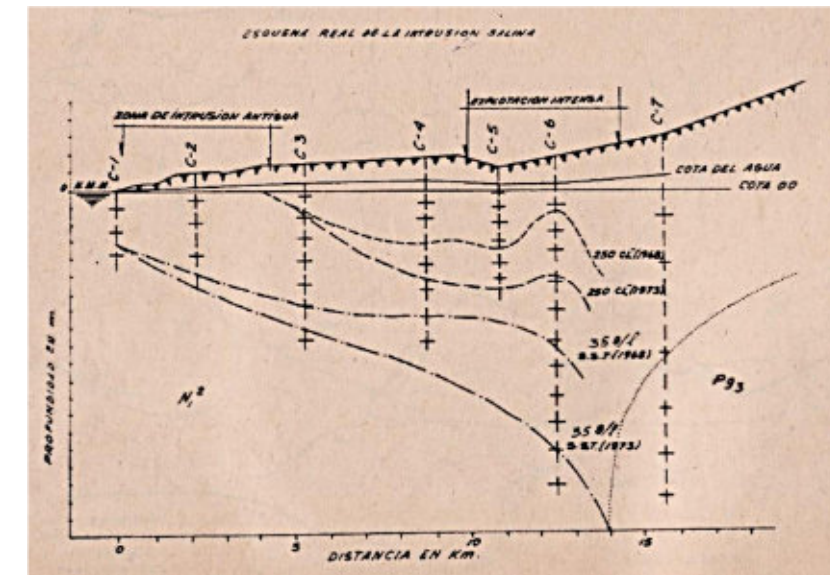
Esos movimientos cambian, de manera temporal o sostenida, la composición química (y eventualmente la calidad) de las aguas en el acuífero costero (incluso en el mismo punto de muestreo. El desplazamiento tierra adentro de las aguas de mezcla más mineralizadas, es la intrusión marina (término correcto, no salina)

La intrusión marina se convierte en un problema de contaminación solamente cuando inutiliza los recursos de agua dulce utilizados para abastecimiento doméstico, agrícola o industria y, en sentido más amplio, cuando afecta los servicios ecosistémicos o perjudica la biota o la composición química de las aguas de elementos naturales (como las cuevas anquihalinas). Y, en este sentido, es cuando constituye un peligro o amenaza para la calidad de las aguas de consumo humano o para riegos específicos. Para la ganadería, sobre todo vacuna, este valor no constituye límite alguno en tanto este tipo de ganado puede consumir aguas hasta con 4 g/L de mineralización total. Pero igual, en tales casos, el gasto

permisible de pozos y obras de captación en el litoral se evalúa adecuadamente y también se proyectan obras de protección y el avance de la intrusión no invalida o inutiliza el aprovechamiento del acuífero.

El límite entre las aguas dulces y marinas **NO** es nítido. Ambos líquidos son miscibles y, por lo tanto, el propio concepto carece de validez. En lo absoluto es claro, bien definido y abrupto y la curva de 1 g/L **NO ES TAMPOCO** indicadora de la posición de la intrusión marina (Figs. 6-8). El concepto originalmente es debido a Badon-Ghyben (1888) y Herzberg (1901). En el corte vertical existe una gradación de mineralizaciones que dependen de la composición litológica, las barreras hidráulicas y geológicas (acuíferos libres, confinados, semiconfinados, retardados, percolante, acuícludas...) y una distribución vertical diferenciada del campo de velocidad de las aguas asociada a la heterogeneidad y anisotropía de las rocas carsificadas y al relieve y estructura geológica de los acuíferos costeros.

El paso de la zona ocupada por las aguas de mar a la zona ocupada por las aguas dulces ocurre en una **zona de transición** que depende absolutamente de la dispersión hidrodinámica de la materia disuelta. Puede ser muy ancha, como en los acuíferos cársicos donde también se presenta de manera irregular en el corte vertical dependiendo de los flujos hacia y desde el mar asociados a la diferente carga hidráulica de los niveles de cavernamiento en profundidad como es el caso de los acuíferos carbonatados Neógeno-Cuaternarios cubanos y comportarse como una línea muy delgada con en acuíferos de muy baja permeabilidad como aquellos en materiales terrígenos o vulcanógeno sedimentarios como los del Cretácico – Paleógeno cubano.



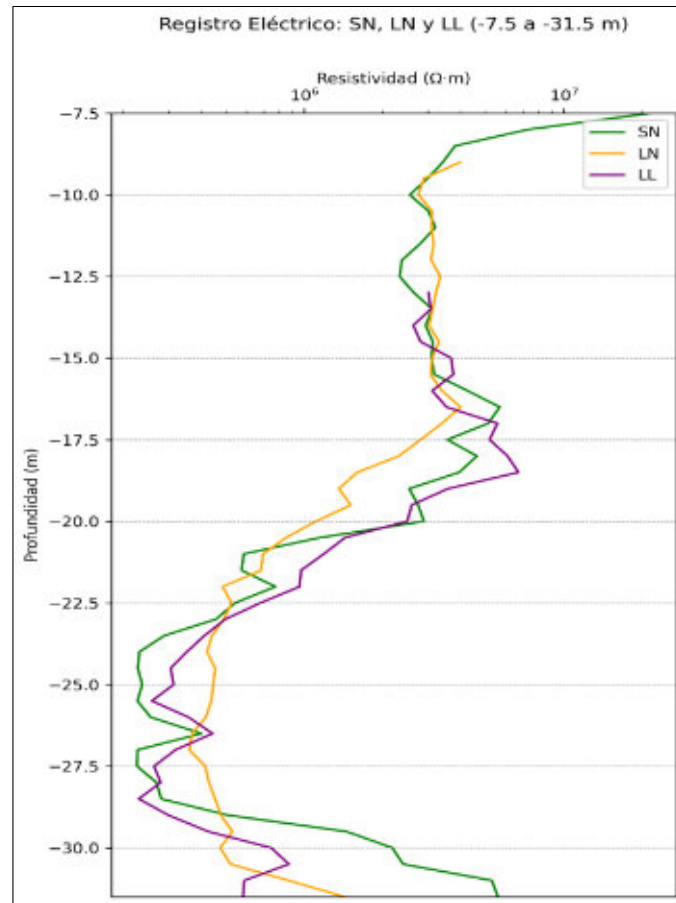


Fig. 8. Perfiles verticales de resistivimetría que muestran las distintas formas de la interfase agua dulce/agua salada en función de las no homogeneidades del acuífero.

El límite demasiado generalizado que fija la intrusión marina definido por la isopleta de 1 g/L **es totalmente engañoso constituye una seria limitación teórica y práctica**. Se adopta por ser el Límite Máximo Aceptable que permiten las normativas nacionales cubanas de agua potable y también las que se recomiendan por la Organización Mundial de la Salud. Sin embargo, todas las aguas con mineralización total (derivada de la suma de los iones dominantes HCO_3 , SO_4 , Cl , Ca , Mg , Na y K expresada en mg/L que sobrepasan ese valor **no necesariamente están asociadas a la intrusión marina**).

TIPOS DE INTRUSIÓN MARINA: CONDICIONES DE CONTORNO DEL PROBLEMA

La intrusión marina en acuíferos costeros es una situación física en la que se desarrolla una estratificación vertical de densidades en las que estas aumentan con la profundidad bajo las aguas dulces (menos densas) formando una cuña que penetra tierra adentro como se mostró en la Fig. 1.

El problema hidrogeológico que presenta la intrusión marina tiene estas componentes:

- ☐ Definir la posición y forma de la interfase agua dulce-agua salada
- ☐ Cuantificar la propagación tierra adentro (horizontal) y hacia los niveles superior del acuífero (vertical; upconing o cono ascendente)
- ☐ Resolver la captación de agua dulce en el litoral o en el acuífero costero previniendo el avance de la intrusión marina

La definición de la posición y forma de la interfase constituye el llamado Problema de Henry (1964a, 1964b) y es un paradigma en el tratamiento del problema de la intrusión marina en acuíferos costeros que originalmente trata de la solución de la posición y forma de la interfase agua dulce-salada en un acuífero confinado con conductividad hidráulica

homogénea sin flujo en el límite superior e inferior con valores prescritos para el flujo y la presión hidrostática del agua marina en el frente costero. En sí mismo, es bastante sencillo, soluble semianalíticamente en su momento, pero que se aleja mucho de las condiciones reales (Hidalgo, Slooten y Carrera, 2007).

La solución de Henry presenta las siguientes limitaciones (Bear y Dagan 1964a, 1964b; Bear et al. 1999; Abarca, 2006):

- ☐ Régimen permanente
- ☐ Desarrollo a partir de funciones de corriente
- ☐ Concentración específica a lo largo del límite costero
- ☐ Ecuación de transporte en términos de velocidad del fluido
- ☐ Valor constante del coeficiente de dispersión
- ☐ No considera la porosidad, la heterogeneidad del acuífero ni la anisotropía

Para ello se han desarrollado dos aproximaciones básicas, como ya fue señalado; a) la que considera un interfase nítida (la clásica “sharp interface”) en que ambos tipos de agua son elementos inmiscibles, sin una zona de transición entre las fuentes dulces y saladas (marinas) y b) la que considera que una zona de mezcla de forma y espesor variable cuyo desarrollo natural está asociado al control de la dispersión sobre una mezcla de aguas de densidad dependiente.

Cuando se abordan tareas de gestión de los recursos hídricos se habla de intrusión marina en singular y se presupone que el proceso es uniforme, único y generalizable sin muchas restricciones. Ello lleva a conclusiones falsas, engañosas o de muy limitada aplicación. La más importante de ellas es la que se presenta en mapas de intrusión marina que unen los acuíferos costeros con una isopleta que generalmente muestra la concentración de 1 g/L de Sales Solubles Totales (TDS) en las aguas subterránea. En menos ocasiones muestran otros indicadores de la presencia de agua de mar en el acuífero (como relaciones iónicas, o una isopleta de 250 mg/L de concentración de cloruros o elementos que, definitivamente demuestren que esa línea que se dibuja paralela al litoral es efectivamente agua de mar mezclada en el acuífero. Y sin hablar del método de interpolación ni del significado del límite $\text{TDS} = 1\text{g/L}$.

Bajo modelo de interfase nítida o de densidad dependiente, hay múltiples casos de intrusión marina que es necesario considerar para cada acuífero en particular. Cada uno se aproxima de manera diferente a la solución matemática de los tres problemas básicos a resolver y, en consecuencia, su generalización de acuíferos contiguos debe hacerse con cuidado.

Una muestra de ello se presenta en la Fig. 9. El término interfase se aplica ahí para una zona de transición que puede ser brusca (modelo hidrostático) y de densidad dependiente (modelo dinámico).

El modelo hidrostático es el que ha sido aplicado comúnmente en Cuba (Goicoechea, 1954; Barros, 1982, 1988; Barros y Llanusa, 2001). En los dominantes acuíferos cársicos costeros cubanos presenta no pocas limitaciones (Molerio, 2002) debidos a las no-homogeneidades y la anisotropía del karst que es preciso tener en cuenta, ya que bajo esta visión estática se han diseñado tanto medidas ingenieras como no estructurales de protección y previsión sobre la calidad de las aguas terrestres de los efectos del Cambio Climático o de la explotación de los acuíferos litorales (González y Feitoo, 1987; Llanusa y Batista, 1991; Plata, 1995; González, 1997a, 1997b; Jiménez, Filipón y Arancibia, 1997; Núñez, 2005; Planos, Rivero y Guevara, 2013).

La hipótesis de que el agua de mar permanece estática de Ghyben-Herzberg no es válida, pues el flujo del agua de mar produce una pérdida de energía que se traduce en una menor penetración de la cuña de agua salina. Por lo tanto, la profundidad de la interfaz se subestima (Pool, Abarca y Carrera, 2007). De igual modo, considerar que el problema se desarrolla en el contacto entre las aguas dulces y las del mar en el borde del litoral y que son válidas las presunciones de Dupuit – Forcheimer para flujo horizontal puede conducir, y de hecho conduce, a resultados inadecuados.

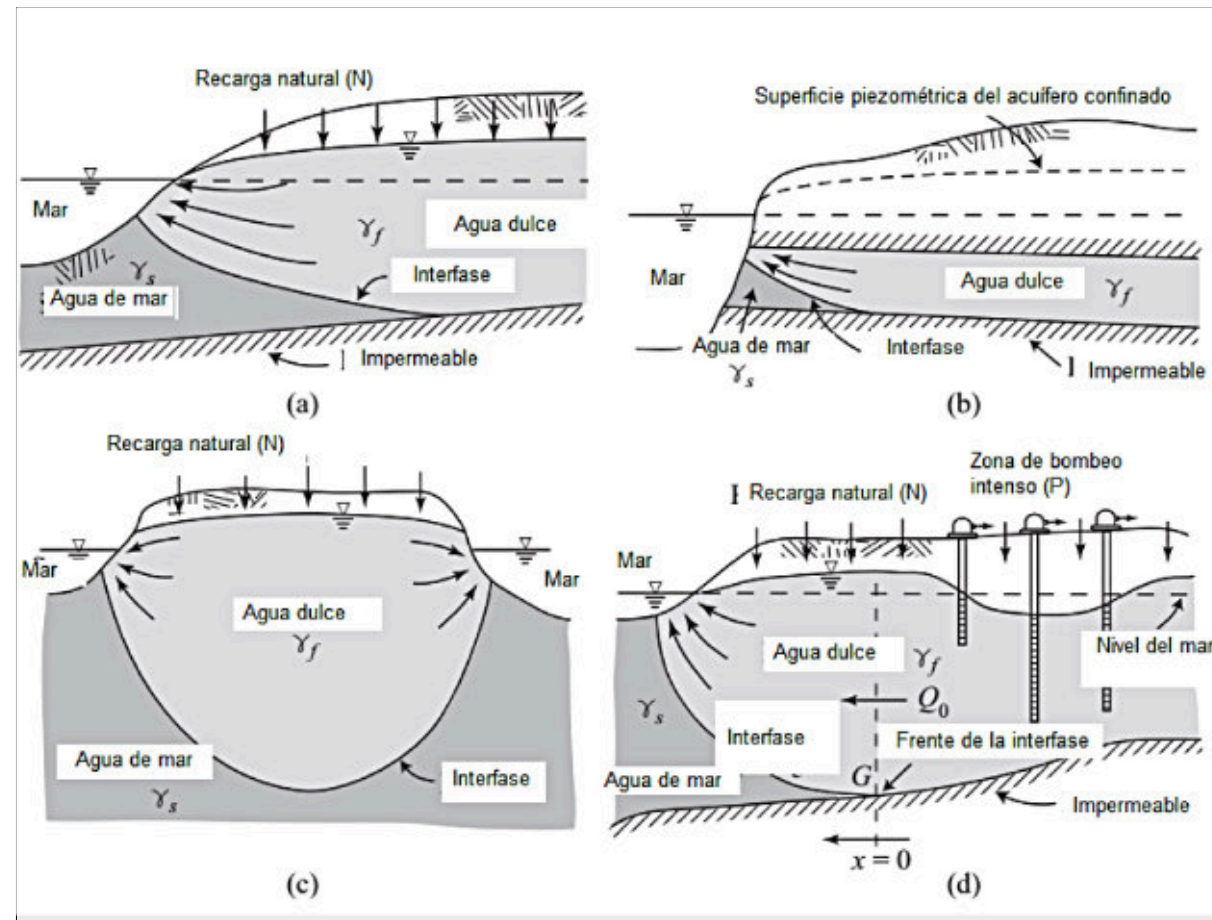


Fig. 9. Secciones verticales típicas de intrusión marina en acuíferos costeros: a) Acuífero libre con recarga; b) Acuífero confinado; c) Lentas de agua dulce en islas; d) Acuífero libre sometido a bombeo (tomado de Bear y Cheng, 2010).

El efecto del desarrollo de las estructuras de conducción del agua en medios anisotrópicos; planos de estratificación, grietas y cavernas produce un efecto de deformación de la cuña de intrusión marina que depende de su distribución, conexión física, geometría y distribución del campo de velocidad del fluido, afectada esta última también por el material que eventualmente rellene o colmate estos espacios. Ya Llopis (1970), en su momento resaltó el papel de la estratificación en el control de la intrusión marina distinguiendo los karsts litorales de tipo conforme, contrario y transversal (Fig. 10).

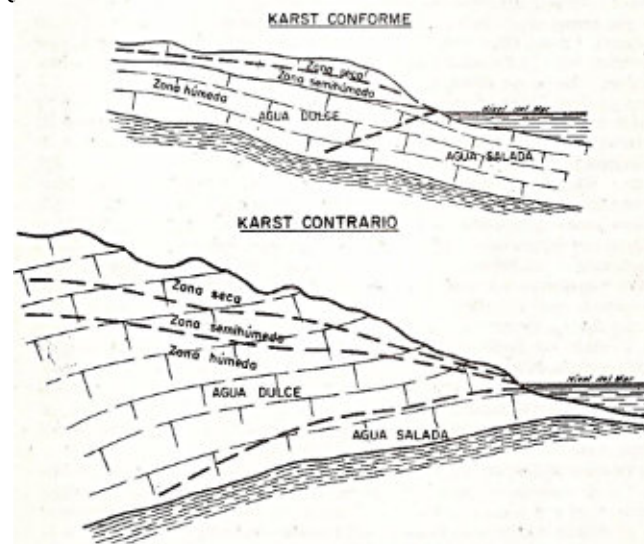


Fig. 10. Tipos de karsts litorales (Llopis, 1970).

El desarrollo del cavernamiento en el litoral tanto las abrasivas que han puesto en contacto descargas de agua dulce en el litoral (Montoriol y Caparrós, 1957; Molerio, 2013) conocidas como cuevas indirectas o las de efecto hipogénico generalizado (Molerio, 2023), como las de Margen Costero (*Flank margin caves*; Mylroie y Carew, 1990a, 1990b) modifican notablemente la hidrodinámica y la química de las aguas. Las descargas concentradas al mar en el litoral o a grandes profundidades y distancias de la costa, como los manantiales submarinos de Río Bueno, Cienfuegos o Bahía de Cochinos o el cavernamiento en la Terraza de Los Portales constituyen serios desafíos y requieren de otros modelos matemáticos para la solución de las descargas y los intercambios de masas (Molerio, 1983; Molerio y Balado, 2012).

La penetración de la cuña de intrusión marina depende de la profundidad del fondo del acuífero (Abarca, 2006) y de la estructura tectonofacial del acuífero. En efecto, los cambios en la forma de la cuenca sedimentarias y las variaciones faciales horizontales y verticales condicionan tanto desarrollos diferenciados de a carsificación y el cavernamiento en acuíferos carbonatados, como diferentes distribuciones del espacio de las grietas o de la morfología del dominio de flujo en sistemas deltaicos.

En este sentido Pool, Abarca y Carrillo (2007) han destacado que la gran diferencia de escalas vertical y horizontal en los acuíferos puede ser un problema en tanto afecta la discretización espacial y del tratamiento de la dispersividad. En el caso de acuíferos confinados, también el efecto de la gravedad se ve también condicionado por la forma del fondo del acuífero. En este sentido, diferentes morfologías del acuífero provocan que *“las pendientes laterales (paralelas a la línea de costa) son críticas para la definición geométrica de la intrusión marina ya que las pendientes laterales provocan que la celda de convección de agua salada se desarrolle preferentemente en horizontal, dando lugar a zonas preferentes de intrusión y zonas preferentes de descarga de agua dulce a lo largo de la costa”*.

Usando los grupos adimensionales discriminados del problema de Henry, grupos con un claro significado físico y orden de magnitud, Alhama et al (2014) han estudiado la posición de las cuñas de intrusión y recirculación, comprobando que dichas cuñas no coinciden en su base (sobre el fondo del acuífero) cuando cambia el valor de estos grupos.

SOLUCIONES ANALÍTICAS

El modelo natural real más común en Cuba (y en muchos acuíferos litorales del Golfo de México y El Caribe) es el de un acuífero anisotrópico libre (sin presión) que descarga al mar y donde la mezcla de las aguas dulces (frescas) terrestres y las marinas tiene lugar en una zona de transición de densidad variable cuya geometría viene definida por la estructura del campo de flujo en la zona de intercambio y los patrones de dispersión hidrodinámica (Antigüedad et al, 1997).

La solución moderna clásica de la intrusión marina en un acuífero costero se debe a Henry (1964a, 1964b). Abarca (2006) representa la mezcla por medio de un tensor de dispersión dependiente de la velocidad tratándolo como el **problema de Henry dispersivo**.

La intrusión marina se caracteriza por la penetración de la interfaz, el ancho de la zona de mezcla y el flujo de agua salada que entra en el acuífero. El ancho de la zona de mezcla depende, básicamente, de la dispersión. La dispersión transversal y longitudinal afectan a diferentes partes de la zona de mezcla, aunque su efecto global es similar. La penetración de la cuña está controlada fundamental mente por la permeabilidad horizontal y por la media geométrica de los coeficientes de dispersión. La dispersión transversal y la media geométrica de las permeabilidades son los parámetros que rigen la cantidad de agua salada que penetra en el acuífero. En acuíferos confinados de gran extensión horizontal, la pendiente lateral resulta ser un factor crítico. Pendientes laterales de más de un 3% inducen el desarrollo de celdas de convección horizontales. Las zonas más profundas actúan de zonas preferentes de entrada de agua salada mientras que las zonas preferentes de descarga se sitúan más cerca de los márgenes laterales, mas someros (Abarca, 2006). Se presentan los casos de acuífero en equilibrio y acuífero alterado por bombeo con desarrollo de cono ascendente (upconing) de intrusión marina.

Las simplificaciones que implica ese modelo conceptual clásico son las siguientes (véanse los diferentes casos en las Figs. 11 y 12)

- ☐ El acuífero es una formación única porosa y homogénea
- ☐ La interfase es nítida entre las aguas dulces y saladas
- ☐ La interfase es estacionaria, en la que las aguas dulces se mueven y las marinas permanecen inmóviles
- ☐ El flujo es bidimensional en el plano vertical normal a la costa
- ☐ El flujo de las aguas subterráneas es esencialmente horizontal que, en acuíferos freáticos es justamente equivalente a la presunción de Dupuit (1963) que sostiene la famosa relación 1:40 del modelo de Ghyben-Herzberg
- ☐ En el caso de tratarse de un acuífero freático, la recarga tiene lugar a una tasa uniforme
- ☐ La solución analítica de la forma de la interfase nítida en un acuífero freático costero considera que, en todas partes del dominio, el flujo es perpendicular a la costa

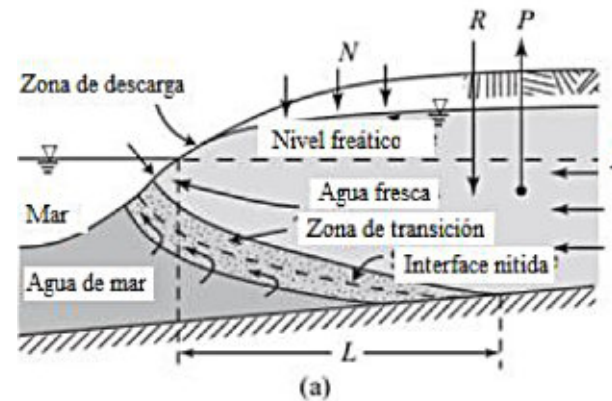


Fig. 11. Dos secciones típicas de zonas de transición en acuíferos costeros (Bear y Cheng, 2010).

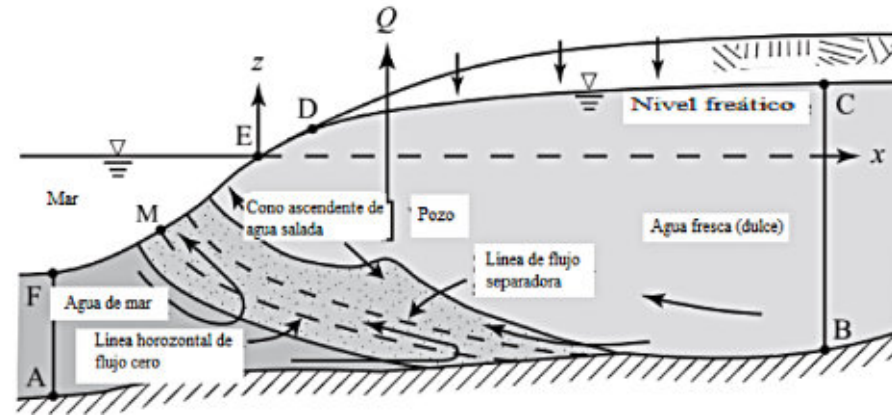


Fig. 12.. Zona de transición con cono ascendente (intrusión vertical localizada) en una sección vertical de un acuífero costero (Bear y Cheng, 2010).

El algoritmo complejo combina la Ecuación de Continuidad con las ecuaciones de flujo horizontal de Dupuit-Forscheimer y las de Ghyben-Herzberg-Luszczynski y la modificación de Vacher para resolver la posición de la interfaz agua dulce-agua salada y su propagación tierra adentro en respuesta a alturas cambiantes del nivel del mar en un medio anisotrópico.

El algoritmo debe integrar (Bear y Cheng, 2010) las siguientes componentes:

- ☐ Ecuaciones de balance de masas para el agua (=solución salina)
- ☐ Ecuaciones del sistema de flujo

- Ecuaciones de balance de masas para las sales disueltas
- Ecuaciones de flujo para las sales disueltas
- Las ecuaciones de advección de agua fresca (dulce) y la mezcla con agua de mar hacia el mar y, bajo ciertas condiciones, desde el mar tierra adentro
- La descripción de la recirculación de ambos tipos de agua y sus gradaciones de densidad
- Las ecuaciones de dispersión hidrodinámica (dispersión y difusión molecular)

Efecto de la concentración de soluto

El efecto de la concentración sobre la viscosidad dinámica del fluido se define por la relación constitutiva de Lever y Jackson (1985);

$$\mu = \mu_{f0}\mu_r = \mu_{f0}(1 + 1,85\omega)4,1\omega^2 + 44,5\omega^3$$

Donde μ_{f0} se corresponde con $\omega=0$ y $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_{f0}}$ es la viscosidad relativa²

Ecuación general de flujo

La ecuación general de flujo del fluido se aproxima por la Ley de Darcy tomando en cuenta la anisotropía a partir de la caracterización de la conductividad hidráulica k , como un tensor simétrico de segundo orden, de manera que la descarga específica respecto al sólido se plantea como:

$$q_r \equiv \phi(V - V_s) = -\frac{k}{\mu} \cdot (\nabla p + \rho g \nabla z)$$

En la que V y V_s son los vectores de velocidad del agua y de la matriz sólida respectivamente, ϕ , porosidad, K , el tensor simétrico de segundo orden de la conductividad hidráulica anisotrópica y q_r , el vector de descarga específica respecto a la matriz sólida.

Asumiendo $V_s \sim 0$, $q_r \sim q$, por lo que en términos de h' , siendo $h' = z + \frac{p}{\rho_f g}$, la ecuación anterior puede reescribirse del modo siguiente:

$$q_r \equiv \phi(V - V_s) = -\frac{K_f}{\mu} \cdot (\nabla h' + \beta_c \nabla z)$$

Para,

$K_f = \frac{\rho_f g k}{\mu_f}$ siendo K_f la conductividad hidráulica anisotrópica respecto a la densidad y viscosidad de referencia para las aguas dulces; z , es la coordenada vertical, p la densidad y g , la gravedad

Bear, Zaslavsky e Irmay (1968) y Bear (1993) han presentado una excelente descripción de la generalización de la Ley de Darcy a medios anisotrópicos., tomando la conductividad hidráulica K , como medida de la dependencia del valor que adopta respecto a la dirección en que se mide. Se trata, en el caso general, de un sistema en el cual los vectores q y J no son paralelos; lo que significa que puede haber flujo en una dirección aun cuando el gradiente en esa dirección desaparezca.

En tal caso, la Ley de Darcy puede plantearse de una forma lineal homogénea más general, del modo siguiente:

$$\begin{aligned} q_1 &= K_{11}J_1 + K_{21}J_2 + K_{31}J_3 \\ q_2 &= K_{12}J_1 + K_{22}J_2 + K_{32}J_3 \\ q_3 &= K_{13}J_1 + K_{23}J_2 + K_{33}J_3 \\ K_{ji} &= K_{ij} \end{aligned}$$

² Seguimos la simbología de Bear y Cheng, 2010)

$$J_1 = w_{11}q_1 + w_{21}q_2 + w_{31}q_3$$

$$J_2 = w_{12}q_1 + w_{22}q_2 + w_{32}q_3$$

$$J_3 = w_{13}q_1 + w_{23}q_2 + w_{33}q_3$$

$$w_{ji} = w_{ij}$$

Que, en notación tensorial se escribe:

$$q = JK$$

$$q_i = J_i K_{ij}$$

De manera que $J = qw$ o $J_i = q_i w_{ij}$. Aquí, entonces, K representa los nueve coeficientes K_{ij} y es el tensor de conductividad hidráulica, w es el tensor de resistividad hidráulica, que también puede plantearse como:

$$w = K^{-1}; w_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta}$$

Donde Δ es el determinante K_{ij} de los coeficientes K_{ij} , que son las componentes del tensor. Δ_{ij} es el subdeterminante que corresponde a K_{ij} . En general $w_{ij} \neq \frac{1}{K_{ij}}$.

Un aspecto sumamente importante desde el punto de vista conceptual, como práctico es la semejanza, ya notada por aquellos autores, entre la descripción anterior y las Relaciones Fenomenológicas de Onsager para flujo irreversible, derivadas de la Termodinámica de No equilibrio en la que, ahora, q se correspondería con el flujo; J, con las fuerzas termodinámicas y K_{ij} con los coeficientes fenomenológicos α_{ij} . A partir del Teorema Fundamental de Onsager, la matriz de α_{ij} es simétrica, por lo que:

$$\alpha_{ji} = \alpha_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$$

Y, por la misma razón, K y w son tensores simétricos de segundo orden.

Esto lleva a tres propiedades importantes y fundamentales para conceptualizar la hidrodinámica del sistema:

- Existen tres direcciones mutuamente ortogonales que son las direcciones preferenciales de K a lo largo de las cuales las componentes q y J son proporcionales
- Las trazas del tensor son invariantes; es decir, independientes de las direcciones x, y, z
- Solo hay una dirección principal de K en el sistema medido

Esto lo podemos ver a continuación, ya que las direcciones principales de K en x', y', z' son mutuamente ortogonales y las componentes q y J son proporcionales a lo largo de ellas y no hay mezcla de términos; es decir que se cumple $K_{ij} (i \neq j)$:

$$q' = K'J'; q'' = K''J''; q''' = K'''J'''$$

$$J' = w'q'; J'' = w''q''; J''' = w'''q'''$$

$$w' = \frac{1}{K'}; w'' = \frac{1}{K''}; w''' = \frac{1}{K'''}$$

En el caso de capas delgadas paralelas, macroscópicamente (1) son normales a las capas y (2,3) paralelas.

Las trazas del tensor, por su parte, son invariantes respecto a x,y,z, debido a que:

$$K_{11} + K_{22} + K_{33} = \text{const} = K' + K'' + K'''$$

$$w_{11} + w_{22} + w_{33} = \text{const} = w' + w'' + w'''$$

Para el caso de flujo horizontal se adopta la aproximación de Dupuit-Forcheimer, habida cuenta de las desviaciones locales. Mientras que en acuíferos isotrópicos $T_x = T_y = T (K+H)$; siendo H, el espesor acuífero) la tasa de flujo total Q equivale $q = -T \nabla h = TJ$; por lo que $Q_n = TJ_n$, con el vector J normal a la equipotencial en el caso de acuíferos anisotrópicos y, en particular, del karst, es necesario considerar dos correcciones: a) la correspondiente a la dirección de flujo que, en dependencia de las no homogeneidades provoca que la dirección real de flujo no sea perpendicular a las equipotenciales (Fig. 13), sino separadas cierto ángulo asociado con la dirección dominante de K y b) el propio concepto de acuífero que se adopte, entre las concepciones extremas de Thraillkill (1968, Figs 14 y 15) y los espacios constitutivos del karst involucrados en cada problema concreto (Tabla 1).

Para Abarca (2006) la heterogeneidad produce un retroceso de la penetración de la cuña, mientras aumenta en el ancho y la pendiente de la zona de mezcla. La forma de la interfaz y el flujo de agua salada son función de la distribución de las permeabilidades en cada realización. Sin embargo, los resultados de la penetración de la cuña y el ancho de la zona de mezcla no presentan grandes fluctuaciones. En caso de heterogeneidad moderada, ambas variables pueden ser reproducidas de forma satisfactoria por un medio homogéneo con dispersión local o efectiva.

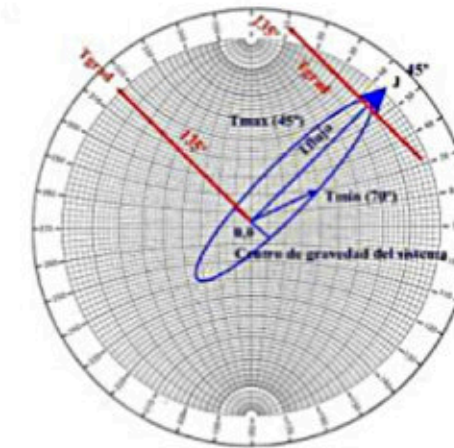


Fig. 13. Componentes reales de la dirección de flujo en función de las transmisividades preferenciales (Molerio, 2006)

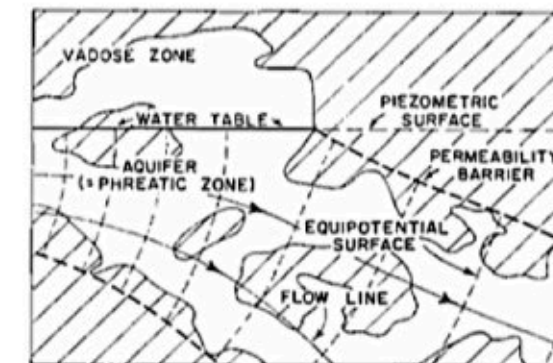


Fig. 14. Región de desarrollo del cavernamiento=acuífero (Thraillkill, 1968)

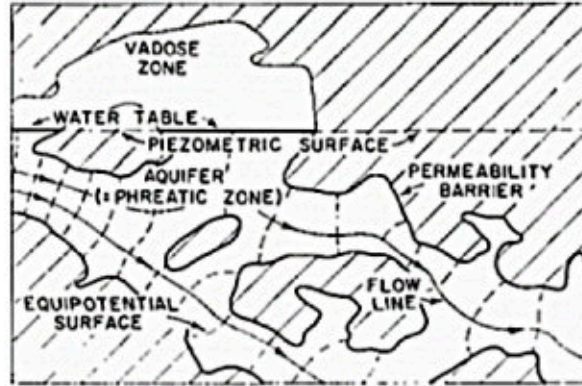


Fig. 15. Concepto alternativo de acuífero carbonatado = caverna (Thraillkill, 1968)

En el caso de la intrusión marina describiendo una zona de transición estrecha con flujo paralelo a ella. Asumiendo un Número de Peclet menor que 1 o, en cualquier caso, no mucho mayor, la advección dominaría sobre la dispersión, en cuyo caso se tiene:

$$S_0 \frac{\partial h'}{\partial t} + \phi \beta_c \frac{\rho}{\rho_f} \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \left[\frac{(1 + \beta_c C)}{\mu_r} K_f \cdot (\nabla h' + \beta_c C \nabla z) + \phi \beta_c D \cdot \nabla C + \frac{\rho_R}{\rho_f} Q_n - (1 + \beta_c C) Q_p \right]$$

$C = \frac{\omega_m - \omega_f}{\omega_s - \omega_f}$ para $0 \leq C \leq 1$, siendo ω el valor de TDS en la muestra, el agua fresca dulce y el agua de mar referenciales (subíndices m,f,s). La densidad y presión se denotan por ρ y p . β_c es un factor de diferencia de densidad (adimensional)

Ecuación general de balance para las sales disueltas

Para los Sólidos Totales Disueltos (TDS) en el agua, la ecuación de balance se puede escribir del modo siguiente:

$$\frac{\partial \phi \rho \omega}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \omega q - \phi \rho D_h \cdot \nabla \omega) + \rho_R \omega_R Q_R - \rho \omega Q_P$$

Donde D_h es el tensor simétrico de segundo orden de la dispersión hidrodinámica ($D_h = D + D^*$), donde D^* es el coeficiente de difusión molecular en el medio tomado poroso (Bear y Dagan, 1964a, 1964b; Bear y Buchlin, 1991; Bear, 1993; Bear, Tsang y De Marsily, 1993; Bear et al. 1999).

La solución simultánea de estas dos últimas ecuaciones permite describir la intrusión marina como un problema de densidad variable tomando en cuenta la dependencia de ρ sobre c y, por tanto, sobre C y la relación entre Q , h y C definida por:

$$q = -\frac{K_f}{\mu_r} (\nabla h' + \beta_c C \nabla z)$$
$$K_f = \frac{\rho_f g k}{\mu_f}$$

Esta última relación es trascendente para el análisis del flujo en sistemas de grietas.

Tabla 1. Espacios constitutivos del sistema cársico (según Molerio, 1985).

CATEGORÍAS			DENOMINACIÓN DEL ESPACIO	VOLUMEN CON RELACIÓN AL SISTEMA	LONGITUD CARAC-TERÍSTICA	RÉGIMEN DE FLUJO	DIÁMETRO	
E S P A C I O A G R I C O L O C A R S I C O	E S P A C I O A G R I C O L O	M A C R O D I S C O N T I N U I D A D E S	1. Cavernas	$V \leq 1\%$	km.	No lineal de alta velocidad	m	
			2. Grietas discontinuidades 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
	E S P A C I O A G R I C O L O	M I C R O D I S C O N T I N U I D A D E S	3. Poros de la matriz rocosa (microfracturas):	$5\% < V \leq 40\%$	mm	No lineal de baja velocidad (microflujo)	$\leq 0,1 \text{ mm}$	
			- 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	

EL MODELO DE GHYBEN-HERZBERG: APROXIMACIÓN HIDROSTÁTICA

La posición de la intrusión marina que puede derivarse de la aplicación de los principios de Ghyben y Herzberg –definida por la posición de la interfase y, en la práctica habitual, por la isopleta de 1000 mg/L de sales totales disueltos (TDS)- es menor que la profundidad real (Todd, 1970) debido a que la presión total a lo largo de una línea equipotencial es constante y las líneas de flujo se inclinan hacia arriba (Fig. 16), como ha señalado Hubbert (1940).

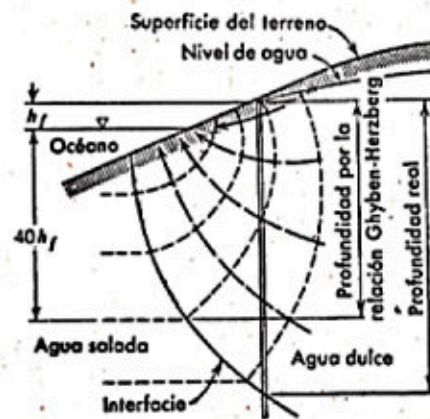


Fig. 16. Discrepancia entre la profundidad real del agua salada y la profundidad calculada por la relación de Ghyben-Herzberg

La aplicación del principio de Ghyben-Herzberg requiere de algunas condiciones adicionales. Por un lado, que la lámina acuífera (o la superficie piezométrica, según sea el caso de un acuífero libre o confinado) a) descansa *por encima* del nivel del mar y b) que la pendiente esté inclinada hacia el océano. La intrusión está limitada por:

- La extensión del acuífero
- La elevación del nivel de agua
- La interrupción que produce la descarga de agua dulce al mar
- La ruptura del equilibrio hidrostático (cuando existe el equilibrio *no hay flujo*)

La interfaz agua dulce/agua salada se sitúa a la profundidad en que se equilibran las fuerzas opuestas debidas al peso de las aguas dulces que flotan sobre las aguas saladas. La elevación de la interfaz respecto al nivel del mar ocurre cuando la presión de la columna de agua dulce se equilibra con la presión de las aguas saladas, de manera que:

$$z_i \rho_s = (z_i + h_f) \rho_f$$

donde z_i es la elevación de la interfaz; ρ_s , la densidad del agua salada; h_f , la carga de agua dulce en la interfaz y ρ_f , la densidad del agua dulce. Todas las elevaciones y cargas están referidas al nivel del mar y son positivas en la dirección ascendente.

Resolviendo adecuadamente para z_i , se obtiene que:

$$z_i = \left(\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \right) h_f$$

Por lo común se asume que $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$, equivalente a la densidad del agua de mar y $\rho_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$, para el agua dulce, de manera que z_i puede derivarse como:

$$z_i = -40h_f$$

Una característica que se deriva de la relación de Ghyben-Herzberg es que la carga de agua dulce y la elevación del nivel de las aguas subterráneas son iguales en la interfaz. Por ello, la posición de ésta puede estimarse multiplicando la elevación absoluta del nivel de las aguas subterráneas por el factor -40 . En correspondencia con las normativas cubanas de agua potable, se toma el límite asociado a las aguas con mineralización total de 1 g/L .

En esos sectores, h_f puede diferir notablemente de la elevación del nivel de las aguas subterráneas, por lo que la relación de Ghyben-Herzberg puede resultar imprecisa en la predicción de la posición de la interfaz.

La aplicación del Modelo de Ghyben-Herzberg se basa en admitir: a) la validez de la relación 1:40 y b) la existencia de flujo horizontal conforme a las aproximaciones de Dupuit-Forcheimer.

Esto conduce al siguiente modelo conceptual:

- ☐ El acuífero es libre (no confinado) y homogéneo
- ☐ El espesor de la interfaz es nulo
- ☐ Las componentes verticales de la velocidad de flujo son despreciables
- ☐ El flujo sigue los principios de la Ley de Darcy
- ☐ Los cálculos pueden realizarse por unidad de ancho de acuífero sobre una reacción vertical perpendicular a la costa
- ☐ La interfaz corta el nivel del mar en la propia línea de la costa
- ☐ El acuífero no descarga al mar
- ☐ La densidad de ambos fluidos es asumida constante
- ☐ Límite abrupto entre los dos fluidos
- ☐ No considera oscilaciones de marea ni variaciones por recarga/descarga

En el caso que tratamos acá, la primera simplificación conduce a que, en realidad, la profundidad de la interfase es mucho menor que la calculada por la relación del modelo, ya que no considera la zona de dispersión que, localmente, puede ser muy importante (Figs. 17-19).

Desviaciones del Modelo de Ghyben-Herzberg

Las causas de las desviaciones en el pronóstico de la interfaz a partir de la relación de Ghyben-Herzberg fueron ya señaladas por Izuka y Gingerich (1998). Estas son: a) existencia de flujos verticales; b) las no-homogeneidades del acuífero y c) la anisotropía del campo de propiedades físicas.

Molerio (2002) señaló, para el karst, la presencia de gradientes verticales de flujo en acuíferos cársicos puede deberse a dos causas fundamentales; a) el efecto de flujo vertical debido al movimiento ascendente del agua dulce en la zona de descarga, y b) el efecto de propagación de la marea oceánica tierra adentro.

La descarga de los acuíferos cársicos costeros puede ser tanto concentrada como difusa, al nivel del mar, sobre éste o incluso submarinas. Ello es consecuencia directa de las no-homogeneidades del acuífero, provocadas por un desarrollo diferenciado de la carsificación.

En los casos en que la descarga sea concentrada, la respuesta a la posición de la interfaz es completamente diferente al caso en que la descarga sea difusa. Por lo común, la descarga concentrada frena la penetración local de la intrusión marina en tanto responde a patrones hidrodinámicos en los que destacan gradientes hidráulicos más pronunciados y, por ende, una mayor velocidad de circulación y mayor caudal de descarga, consecuencia de una alta conductividad hidráulica. Sin embargo, cuando la descarga es difusa, el equilibrio entre las aguas dulces y saladas es sumamente precario, y mucho más sensible al incremento de gradientes verticales que pueden estar acelerados, incluso, por la explotación de las aguas subterráneas en la línea de costa, por la evaporación o evapotranspiración, que pueden ser particularmente intensas – habida cuenta de la proximidad a la que suelen encontrarse tales aguas subterráneas a la superficie en los acuíferos libres –, o a la presencia de dolinas lacustres (blue holes, cenotes, casimbas) que constituyen superficies líquidas abiertas donde las pérdidas pueden ser localmente intensas.

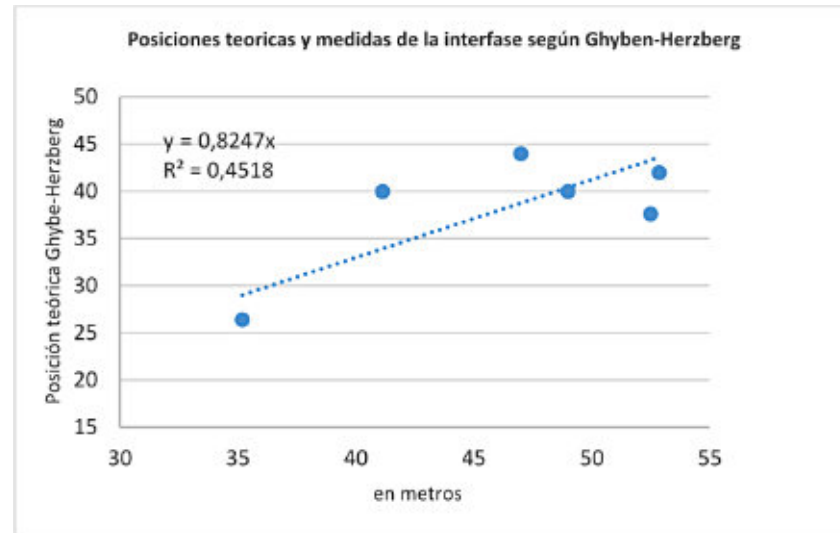


Fig. 17. Posición estimada de la interfaz por el Modelo de Ghyben – Herzberg y posición real medida (en metros desde la superficie)

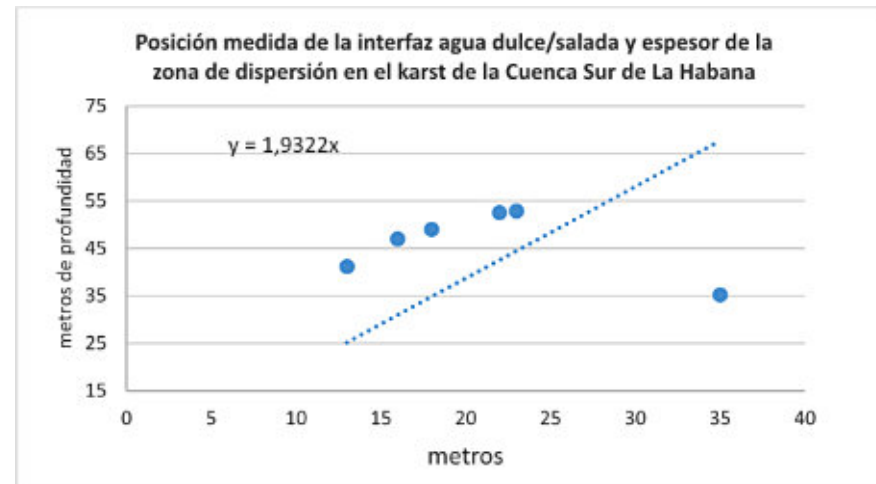


Fig. 18. Posición medida de la profundidad de la interfase agua dulce/salada y espesor de la zona de dispersión en pozos de observación batométrica en el karst de la cuenca Sur de La Habana

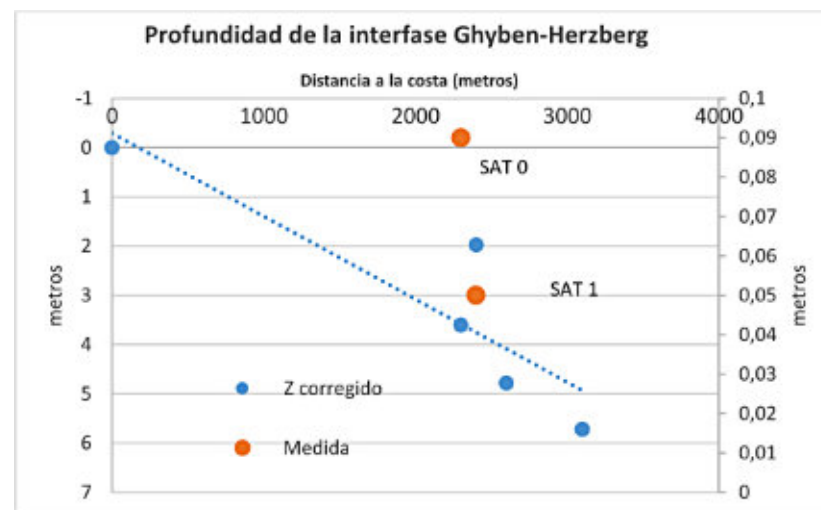


Fig. 19. Profundidad de la interfaz calculada por Ghyben-Herzberg

Se trata de un efecto en que muy ligeras variaciones de la elevación del nivel de las aguas subterráneas provocan sobreestimaciones o subestimaciones importantes en el pronóstico de la posición de la interfaz. Por ello es conveniente disponer de medidas precisas de la oscilación de la marea oceánica y estimar la velocidad de propagación de la misma tierra adentro, así como las variaciones que causará respecto a la altura del nivel piezométrico en el acuífero (Molerio, 1992, 1994). Asimismo, las variaciones faciales verticales, por su parte, al exhibir distintos valores de conductividad hidráulica provocan distribuciones diferentes en la velocidad de propagación de la marea tierra adentro.

La propagación de marea tierra adentro es un fenómeno de particular importancia en la variación de la posición de la interfaz. Tal corrección fue añadida por este autor Molerio (2006) a las ecuaciones de Izuka y Gingerich (1998) para casos donde la influencia de la marea era importante y contribuía al incremento o decremento artificial de la carga hidráulica, variando los gradientes verticales como consecuencia, y añadido a la anisotropía de la transmisividad, se produce cíclicamente un efecto de cambio de dirección y gradiente en el dominio de flujo.

Las no homogeneidades más importantes del acuífero están asociadas a la distribución vertical de las facies litológicas y del cavernamiento asociado. Estos niveles, que se definen como sectores de desarrollo preferencial de flujo en conductos, están asociados a las variaciones del nivel de base de erosión y son especialmente notables como consecuencia de la extraordinaria amplitud que alcanzó la oscilación del mar durante el Cuaternario. En la región del Golfo de México y el Caribe (Fig. 5) alcanzó, al menos, los 300 m (Molerio y Flores, 1997).

Otro efecto de las no-homogeneidades del acuífero cársico, se manifiesta en el variable espesor de la zona de transición entre las aguas dulces y saladas ya que, aunque la mayoría de los modelos asumen, por comodidad, que ambos fluidos son inmiscibles, lo cierto es que se trata de una zona de espesor variable que, teóricamente, debe ir incrementando la salinidad con la profundidad pero que, sin embargo, exhibe notables variaciones debido, precisamente, al aporte de aguas con diferente salinidad que circulan por los distintos niveles de cavernamiento.

Uno de los efectos más notables de las no-homogeneidades del acuífero es la presencia de bolsones de agua salada que aparecen aislados, tierra adentro, sin que desde la costa pueda observarse una continuidad horizontal de la cuña de intrusión marina (González et al., 1989). Estos focos locales se acentúan cuando se explotan las aguas subterráneas, pero no necesariamente están asociados a ello.

Los niveles de cavernamiento no necesariamente están vinculados a flujos concentrados. Cuando es así, lo más común es que minimicen los gradientes verticales o, incluso, lo sustituyan por flujo horizontal. Es interesante que, en sectores donde varios niveles de cavernamiento se superponen, la cuña de intrusión marina presenta una forma muy irregular, en dependencia de los caudales de descarga de tales niveles de flujo (Fig. 20), de una manera muy semejante a lo que ocurre en acuíferos estratificados.

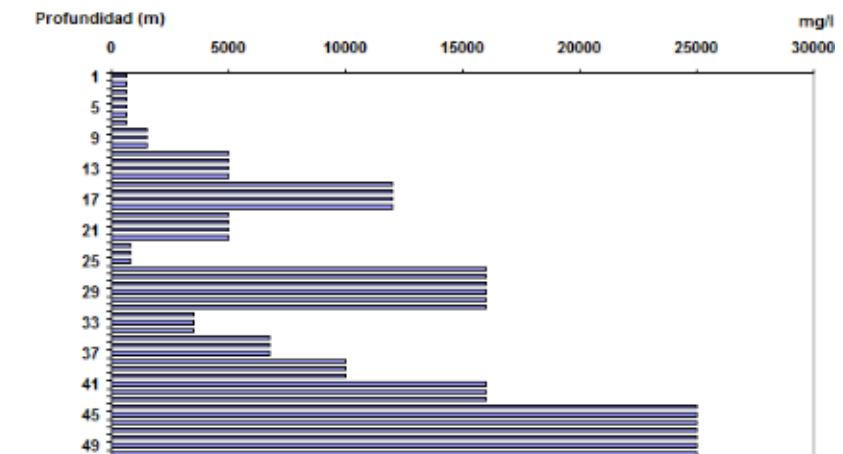


Fig. 20. Distribución vertical de la mineralización en un acuífero cársico costero con niveles superpuestos de cavernamiento (Molerio, 2002).

La anisotropía de las propiedades físicas es uno de los fenómenos característicos de los acuíferos cársicos, de manera que es común encontrar fuertes gradientes verticales de carga asociados a zonas de no-homogeneidades. Particularmente importante es, en este caso, la variabilidad vertical de propiedades que, como la conductividad hidráulica, presentan una componente en la dirección del flujo y otra en la dirección del gradiente hidráulico. Asumir, por tanto, valores promediados para la conductividad hidráulica en acuíferos no homogéneos conduce, por lo general, a errores groseros en la estimación de la interfaz.

INTERFASES DE GLOVER

El Modelo de Glover (1959, 1964) se basa en el conocimiento del flujo y la magnitud de la descarga del acuífero de agua dulce en el mar. Glover adoptó la imagen de un flujo a través de un dique no drenado semiinfinito descansando sobre un estrato horizontal para explicar la distribución del campo de presiones, las líneas de flujo y las líneas de corriente (Figs. 21-22).

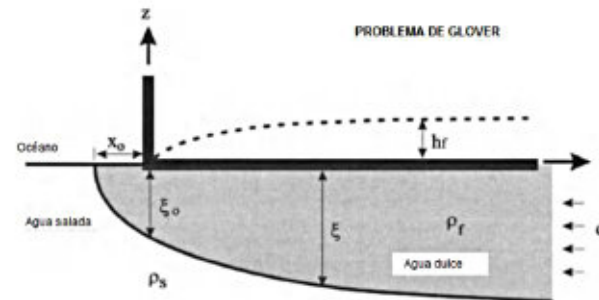


Fig. 21. Términos del Problema de Glover.

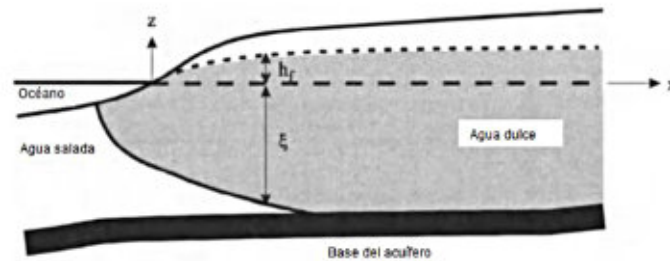


Fig. 22. Referencia para la interfase de Glover.

Como bien han señalado otros autores (particularmente De Wiest, 1969), la analogía no es perfecta ya que no se da una correspondencia exacta entre todas las condiciones de contorno para el movimiento del fluido en ambos problemas, por lo que este autor ajustó las condiciones de borde para la interfaz agua dulce-agua salada y la superficie libre en el dique asumiendo que el nivel de las aguas subterráneas es completamente horizontal, por lo que la ecuación original de Glover se transforma en:

$$y^2 = \frac{2Qx}{K \left(\frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f} \right)} + \frac{Q^2}{K^2 \left(\frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f} \right)^2}$$

Donde,

y , es la profundidad de la interfaz (m)

K , la conductividad hidráulica (m/día)

Q , la descarga de agua al mar por metro lineal de costa (m³/día/m)

$\left(\frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f} \right)$, es la relación de densidades (con los subíndices f , para el agua dulce y s , para el agua salada)

POTENCIAL DE LUSCZINSKY

Luszczinsky (1961) introdujo el concepto de **flujo de fluidos con densidad variable** para describir acertadamente la situación real, pero más compleja, de la variación de la densidad de la mezcla en la zona de transición entre las dos aguas de la forma siguiente:

$$(\gamma_a - \gamma_d)z_1 = \gamma_d(h_a - \gamma_p)[h_p - (\gamma_p - \gamma_a)z]$$

Siendo, γ_a la densidad media del fluido entre el punto considerado z y el nivel h_a de referencia; h_p el potencial puntual, de acuerdo con la Fig. 23.

..

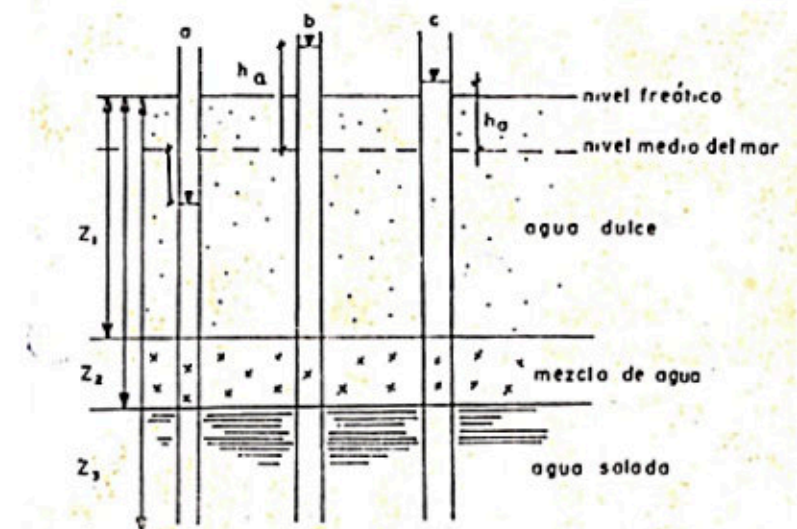


Fig. 23. Términos de la Ecuación de Luszczinsky (1961)

En ausencia de zona de mezcla se obtiene la Ecuación de Hubbert; esto es:

$$z = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} (-\gamma_s h_s + \gamma_d h_d)$$

Suponiendo estacionaria el agua de mar, entonces, con $h_s=0$, se llega a la Ecuación de Ghyben-Herzberg:

$$z = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} \gamma_d h_a = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h_a$$

Y para flujo horizontal,

$$z = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} [-\gamma_p h_p - z(\gamma_p - \gamma_a) + \gamma_d h_d]$$

CONCLUSIONES

Mucha de la confusión y de la gestión deficiente de la intrusión marina se debe a que la conceptualización del problema es deficiente. Ciertas premisas de la aproximación hidrostática pudieran resultar aplicables bajo determinadas condiciones, pero en realidad es un modelo sumamente limitado para la gestión de los recursos hídricos en acuíferos costeros que conduce a conclusiones falsas y a la proyección de obras de defensa sumamente costosas y de dudosa efectividad aun en medios isotrópicos. En medios anisotrópicos el problema se complica aún más y este es el caso de la absoluta mayoría de los acuíferos costeros de Cuba y muchas regiones como Yucatán (México), Jamaica y Puerto Rico, así como de todas las islas carbonatadas del Caribe, donde constituyen la única fuente de agua segura para todos los usos.

El movimiento natural e inducido de fluidos dependientes de la densidad y los procesos de intercambio que tienen lugar en el karst costero aun requieren de soluciones matemáticas que resuelvan satisfactoriamente el problema y sostengan teóricamente la proyección y adopción de medidas –estructurales y no estructurales- de gestión eficiente. Desde la selección de sistemas de explotación, obras de recarga artificial, diseño y operación de sistemas de monitoreo y sustenten medidas más generales respecto a los efectos negativos del Cambio climático.

RECONOCIMIENTOS

El autor debe un reconocimiento especial al Dr Ismael Herrera (Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas e Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México) por haberlo introducido en el enfoque de flujos de densidad variable durante la formulación de los proyectos Modelación de la Intrusión Salina en Acuíferos Cársicos Costeros, Tecnología de Procesamiento, el de Interpretación Automatizada de Datos Sísmicos y Petrofísicos en Yacimientos Naturalmente Fracturados y el de Modelación Matemática del Problema Inverso en Acuíferos Heterogéneos mediante la Aplicación del Método del Multiescalamiento compartidos con mis colegas doctores Susana Gómez, Martín Díaz Viera y Alberto Enrique García Rivero. Eduardo Planos nos animó a retomar estos temas a partir de la necesidad de contribuir en alguna medida a la comprensión más amplia del problema en Cuba.

Muchas evaluaciones de terreno y de procesamiento de gabinete han sustentado nuestros enfoques sobre el problema y por ello mi deuda de gratitud a los colegas con los que he compartido esas ideas y resultados; en particular a Manuel Acevedo González, Raydel Alonso Montero, Mercedes Arellano, William Back, Anthony Randazzo, Osvaldo Barros, Guy Chapon, Ángel Chon Li, Alfredo Contreras, Alberto Cuéllar, Andrés Díaz Arenas, Pedro L. Dorticós, Juan R. Fagundo, Ernesto Flores, Arturo González Báez, Esteban Grau, Mario Guerra Oliva, Joaquín Gutiérrez, Rebeca Hernández, Enrique López, Cecilia March, María del Carmen Martínez, Eduardo Nieto Misas, Alfredo Pérez, Diosdado Pérez Franco, Abel Pérez González, Yoemí Portuondo, Ernesto Rocamora, Katia del Rosario, Orestes Sardiñas, Ernesto Varela Morejón, Nicasio Viña Bayés, Gladis Yera y a Ana, mi compañera.

BIBLIOGRAFÍA

Abarca Cameo, Elena: **Seawater intrusion in complex geological environments**. Tesis. Grupo de Hidrogeología del Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Pol. Catalunya, 33:

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:

Badon-Ghyben, W (1888): **Notas sobre los resultados probables de perforación de pozos cerca de Amsterdam** (en holandés) Tijdschrift van het Koninklijk Inst. van Ing., The Hague, 21: 1888

Barros Mouriño, Osvaldo (1982): **La intrusión salina y sus efectos en la explotación de acuíferos cársicos, casos históricos**. Coloquio Internacional sobre Hidrogeología Cársica de la Región del Caribe, UNESCO, Ciudad de La Habana, 1982

Barros Mouriño, Osvaldo (1998): **Variabilidad de la intrusión salina en cuencas costeras cársicas de Cuba**. Voluntad Hidráulica (87-88):11-20, Ciudad de La Habana, 1998

Barros Mouriño, Osvaldo y Haydée Llanusa Ruiz (2001): **Impacto del Cambio Global en la dinámica de la intrusión marina**. Ingeniería Hidráulica Ambiental, XXI(4):21-28

Bear, J. (1988): **Dynamics of Fluids in Porous Media**. Dover, 764:

Bear, Jacob y J-M. Buchlin (1991): **Modelling and Applications of Transport Phenomena in Porous Media. Lecture Series presented at the von Karman Institute for Fluid Dynamics** Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, Israel y Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genese, Belgium., Rhode-Saint-Genese, Belgium, Nov. 30-Dec. 4, 1987.

Bear, Jacob y Alexander H.-D. Cheng (2010): **Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport**. Springer, 834:

Bear, J., A. H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, I. Herrera (1999): **Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Concepts, Methods and Practices**. Springer Science+Business Media Dordrecht. **Theory and Applications of Transport in Porous Media**, Vol 14, 625:

Bear, J. y Dagan (1964a): **Some exact solutions of interfase problems by means of the hodograph method**. J. Geophys. Res., 69, 1563-1572

Bear, J. y G. Dagan (1964b): **Moving interfase in coastal aquifers**. J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 90, 193-216.1964b.

Bear, J., C-F. Tsang, Ghislain De Marsily (1993): **Flow and Contaminant Transport In Fractured Rock**. Academic Press, Londres, 551:

Bear, J., D. Zaslavsky, S. Irmay (1968): **Physical principles of water percolation and seepage**. UNESCO. Arid zone research, XXIX, Paris, 465:

Cooper, H. H. (1959): **A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer**. Journal of Geophysical Research, 64 (4), 461–467.

Cooper, J., H.H. (1964): **A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer**. Water-Supply Paper 1613-C, U.S. Geological Survey.

Custodio E., G. Bruggeman (1987): **Groundwater problems in coastal areas**. Unesco. Studies and Reports in Hydrology, NQ45. Paris, 596:

de Wiest, R. J. M. (1969): **Flow through porous media**. Academic Press, 530:

Dupuit, J. Etudes (1863) : **Théoriques et Pratiques sur les Mouvement des Eaux dans les Canaux D´ecouverts et `a Travers les Terrains Perméables**, 2nd ed., Dunod, Paris, 304:

Glover, R.E. (1959): **The pattern of fresh water flow in a coastal aquifer**. Jour. Geophys. Res. 64(4):457-49

Glover, RE. (1964): **The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer**. In: **Sea Water in Coastal Aquifers**, H.H. Cooper, F.A. Kohout, H.R Henryand R.E. Glover, eds., U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1613-C,C32-C35, 1964.

Goicoechea, Leandro De (1954): **Contaminaciones salinas de los acuíferos cercanos a las costas**. IV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria, Sao Paulo Brasil, julio de 1954. Revista de la Sociedad Cubana de Ingenieros :535-565

González Báez, A. (1997a): **Obras costeras contra la intrusión salina para el beneficio de los recursos de una cuenca subterránea**. Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. TAHICU 96: 71-86

González Báez, A. (1997b): **La recarga artificial contra la intrusión salina. ¿Hasta dónde resulta eficaz en las formaciones cársicas?** Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. TAHICU 96: 89-103

González Báez, A., Rafael Feito Olivera (1987): **Obras costeras contra la intrusión salina para el beneficio de los recursos explotables**. Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba:71-86.

Hidalgo, J.J. L.J. Slooten y J. Carrera (2007): **Simulación y calibración de problemas de intrusión marina: hipótesis básicas e implicaciones**. Boletín Geológico y Minero, 118 (Núm. Especial): 577-592

Henry, H.R. (1964a): **Interfaces between salt water and fresh water in coastal aquifers**. In/ H.H. Cooper, H.H. Jr.; Kohout, F.A.; Henry, H.R.; Glover, R.E. [Ed] **Sea Water in Coastal Aquifers**. [Geological Survey Water Supply Paper 1613-C, Washington, D.C.:35-69.

Henry, H.R. (1964b): **Effects of dispersion in salt water encroachment in coastal aquifers**. In/ H.H. Cooper, H.H. Jr.; Kohout, F.A.; Henry, H.R.; Glover, R.E. [Ed] **Sea Water in Coastal Aquifers**. [Geological Survey Water Supply Paper 1613-C, Washington, D.C.:70-83.

Herzberg B (1901): **Die Wasserversorgung einiger Norseebiider, J Gasbeleuchtung und Wasserversorgung** 44:815-819, 842-844, Munich

Hubert MK (1940): **The Theory of Ground – Water Motion**. J Geol 48:785-944

Izuka, S.K. y S.B. Gingerich (1998): **Estimation of the depth to the freshwater/saltwater interfase from vertical head gradients in wells in coastal and island aquifers**. Hydrogeology J 6:367-373

Jiménez, S., E.R. Filipon y J. A. Arencibia (1997): **Evolución de la intrusión marina en el acuífero de la Costera Sur**. Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba: 115-123.

Jiménez Echevarría; S.; B.R. Varona Aldama & L.F. Molerio León (1992): **Análisis Estadístico de Variables Hidrogeológicas en la Costera Sur de La Habana**. 1er Taller Iberoamericano de Informática y Geociencias, Acad. Cienc. Cuba, La Habana, : 21

Lever, D.A. y C.P. Jackson, (1985): **On the equations for the flow of a concentrated salt solution through a porous medium**, Harwell Rep. AERE-R. 11765, HMSO, London, 1985.

Llanusa Ruíz, H. y Juan Carlos Batista (1991): **Efecto del dique en la cuenca subterránea del sur de la Habana**. Ingeniería Hidráulica 1993, Vol. XIV, ISPJAE.

Llopis Llado, Noel (1970): **Fundamentos de hidrogeología cárstica. Introducción a la Geoespeleología**. Edit. Blume, Barcelona, 269:

Luszczynski, NJ (1961): **Head and Flow of Groundwater of Variable Density**. J Geophys Res 66:4247-4256

Molerio León, Leslie F. (1983): **Desequilibrio de Geosistemas Hipogeos y Problemas de Contaminación en Áreas Cársicas**

Molerio León, Leslie F. (1989): **Hidrogeología y Recursos Explotables de Cayo Largo del Sur**. Jor. Cient. Resultado '89, Acad. Cienc. Cuba, La Habana,:22

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, Leslie F. (1992): **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. (1994): **Intrusión marina en Acuíferos Cársicos**. Unesco, Universidad Nacional de La Plata, 366:

Molerio León, L.F. (2002): **Desviaciones en la estimación de la profundidad de la interfase agua dulce-agua salada en acuíferos cársicos costeros**. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXIII (3):29-35

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. (2013): **Resumen de la Tipología Hidrogeológica del Karst Cubano**. Aragonito, No. 1, Suplemento del Periódico Digital Espeleológico El Explorador, Cuba:1-25

Molerio-León, L.F. (2016): **Patrones de carsificación y cavernamiento costero del Trópico Húmedo: Implicaciones para la gestión de la intrusión marina**. V Congreso de Geografía Tropical. Convención Trópico 2016. La Habana, Memorias: 213-331

Molerio-León, L.F. (2023): **Tipos de cuevas cubanas y procesos diferenciados de carsificación y cavernamiento**. Gota a gota, nº 29: 74-88. <https://www.researchgate.net/publication/373213056>

Molerio León, Leslie F. & E. Balado Piedra (1989): **Paleoniveles del Mar Cuaternario Identificados en Cavernas Cubanas**. 1er. Cong. Geol. Cubano, La Habana: 84

Molerio León, L.F., E.J. Balado Piedra (2012): **Aplicación del algoritmo de Borichansky-Mijailov modificado para el cálculo de la interacción aguas terrestres-marinas en las zonas costeras carsicas. I. Ecuaciones de gobierno**. Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. Año 13, No.24, 2012 ISSN-1683-8904, La Habana, 8: <http://ama.redciencia.cu/articulos.php?sid=91529a91e366de61e4ac7b8e3f27fb89>

Molerio León, Leslie F. & E. Flores Valdés (1997): **Paleoclimas y Paleocarsos: los Niveles de Cavernamiento y la Variabilidad del Clima Tropical en el Golfo de México y el Caribe** in/D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín & I. Antigüedad (Eds.): **Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba**. Eibar, País Vasco: 225-232

Montoriol Pous, J., J. Assens Caparrós (1957): **Sobre el papel desempeñado por el efecto salino en la génesis de ciertas cavidades kársticas desarrolladas en las líneas de costa**. Rev. Ciencias, Univ. Oviedo, VII(1):81-88

Mylroie, J.E., J.L. Carew (1990): **The Flank Margin Model for Dissolution Cave Development in Carbonate Platforms**. Earth Surface Processes and Landforms, 15:413-424.

Mylroie, J.E., J.L. Carew (1995): **Karst development on carbonate islands**. In/ Budd, D.A., P.M. Harris, A. Saller: **Unconformities and Porosity in Carbonate Strata** (Eds.). Memoir 63, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK, pp. 55–76

Núñez Lafitte, Manuel (2005): **El Dique Sur de la Provincia Habana: una obra para recordar**. Voluntad Hidráulica 97.

Palmer, A.N. (1999): **Anisotropy in carbonate aquifers**. In A.N. Palmer, M.V. Palmer, I. Sasowski: **Karst Modeling**, Proc. Symp. Charlottesville, Karst Water Inst. Spec. Publ. 5 :223-227

Planos Gutiérrez, Eduardo; Roger Rivero Vega; Vladimir Guevara Velazco (2013): **Impacto del Cambio Climático y medidas de adaptación en Cuba**. Inst. Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Minist. Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana, 430:

Plata Bedmar, A. (1995): **Evaluación de la efectividad del Dique Sur, en relación con la intrusión marina del acuífero Habana-Matanzas**. Informe final, OIEA, Ciudad de La Habana, 1995

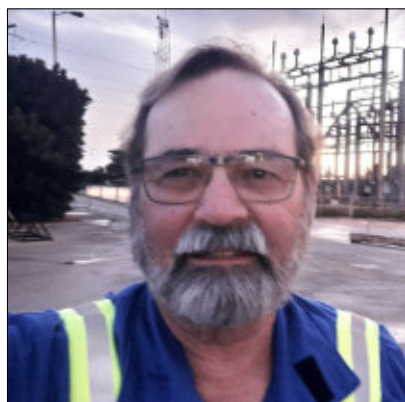
Pool, M., E. Abarca y J. Carrera (2007): **Simplificaciones en la modelación de la intrusión marina: validez y alcance**. Boletín Geológico y Minero, 118 (Núm. Especial): 593-608

Strack, O.D.L. (1976): **A single-potential solution for regional interfase problems in coastal aquifers**. Water Resour. Res., 12, 1165-1174, 1976.

Strack, O.D.L. (1995): **A Dupuit-Forchheimer model for three-dimensional flow with variable-density**. Water Resour. Res., 12, 3007-3017, 1995

Todd, D. K. (1970): **Groundwater Hydrology**. Edic. Revolucionaria, Inst. Cub. Libro, La Habana, 336:

Thraillkill, J. (1968): **Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves**. Geol.Soc.Amer.Bull., 79(1):19-46



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.

SEMBLANZAS

Manuel Fernández de Castro y Suero: 1825 - 1895

El ingeniero Manuel Fernández de Castro y la naturaleza cubana.

Introducción

Durante trece años, a partir de 1859, el ingeniero de minas Don Manuel Fernández de Castro y Suero, desarrolló en Cuba, país en el que vivió en su infancia, una intensa labor. Fernández de Castro, contribuyó sustancialmente a incrementar el conocimiento geológico de la isla, pues elaboró el primer mapa geológico de la isla y llevó a cabo estudios de la estratigrafía, paleontología, mineralogía y estructura. También se destacó en la importante tarea de divulgación científica, que se extendió a otras áreas del saber cómo la meteorología, la sanidad pública, la hidrología, la sismología, la edafología, la legislación, la industria, etc., desde su cátedra en la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana y como director del Diario de la Marina, Fernández de Castro se reveló en Cuba como un verdadero naturalista con una relación científica, política y afectiva con la isla antillana que continuó durante el resto de su vida, incluso después de su regreso a España.¹

Periodo hasta 1859

Manuel Fernández de Castro nació en Madrid el 25 de diciembre de 1825, hijo de D. Felipe Fernández de Castro y Manuela Suero. D. Felipe fue uno de los fundadores en 1829 de La "Gaceta de los Tribunales", revista dominical científico-profesional de los escribanos. El matrimonio tuvo dos hijos, ambos con destacada actividad en la geología y la minera: Manuel y José, nacido este último en 1833, en Santiago de Cuba. Cuando tenía menos de dos



años Manuel se trasladó con su familia a Cuba donde permaneció varios años. En 1841 ingresó en la “Escuela de Ingenieros de Minas de Madrid”, en la que obtuvo el título con solo 19 años.

Manuel fue nombrado “Ingeniero Segundo”, destinado como jefe de las minas de Almadenejos. Un año después, en 1845, se dicta un decreto por el director general del ramo, que, con sobrado fundamento, fue considerado opresivo e injusto, levantando una protesta en la que Manuel Fernández de Castro fue de los más destacados. El joven Manuel mantuvo su posición hasta el punto de solicitar un cese voluntario de su actividad hasta que, en 1853, fue revocada aquella orden. Durante ese tiempo de ausencia, se dedicó a completar su formación en diversos aspectos de la minería, en especial en los ferrocarriles. Luego de estudiar las vías férreas europeas,

ideó un sistema de señales eléctricas para evitar los choques, por cuyo invento adquirió patente. La innovación recibió favorables informes de la Junta de Obras Públicas, la felicitación de las Cortes y merecidas recompensas de parte del Gobierno. Entre las que se encuentra un ascenso especial en el Cuerpo de Minas, La Cruz de Carlos III y la comisión de estudiar los medios para aplicar su invento. Cuando terminó las tareas vinculadas al ferrocarril, estaba vacante una de las plazas del cuerpo de Ingenieros de Minas en Cuba, la cual le fue adjudicada tras su solicitud.

Estancia en Cuba. 1859-1872

En Cuba va a ejercer el cargo de Inspector General de Minas lo que va a simultanear con investigaciones sobre geología y dirigir el "Diario de la Marina". A él se debe, en buena parte, que el diario se convirtiera en un periódico político, científico y literario, comparable, por la amenidad e interés, con los más sobresalientes del mundo. En este medio, publicó numerosos artículos de interés científico general y sobre temas variados. Elaboró el primer mapa geológico de la isla de Cuba, mientras desarrolló el análisis de yacimientos de oro, asfalto, petróleo, hierro, cobre y minerales no metálicos. También estudió los abastecimientos de aguas y los sistemas de drenaje de varias ciudades, y analizó los huracanes y las medidas para mitigar sus efectos. Fueron especialmente reconocidos sus trabajos en el campo de la paleontología, relacionados con el estudio de los grandes mamíferos fósiles, cuando llega a la conclusión de que la isla estuvo unida al continente americano. En 1862 fue uno de los fundadores de la Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de La Habana, que en la etapa inicial incluso se reunían en su casa.

Se debe destacar su labor de exponer al público, en decenas de artículos publicados en el Diario de la Marina, los elementos del marco regulatorio de la legislación² minera en Cuba, explicando las acciones prácticas para tramitar los expedientes.³ En la Exposición Universal de París de 1867, presentó una relación completa de las localidades con una amplia colección de minerales cubanos y una representación de fósiles. En 1969 es

ascendido a inspector general de segunda clase del Cuerpo en ultramar.

Se casó en la parroquia de Guadalupe en la Habana, el 22 de marzo de 1868 con la habanera María Josefa Duquesne y O'Farrill.

Petróleo y asfalto

Desde su llegada a la isla se interesa especialmente por las minas de asfalto y petróleo. En 1859, escribió un informe sobre la presencia de asfalto con una descripción detallada de las minas de Bacuranao, emitiendo algunas consideraciones geológicas sobre la génesis de la acumulación.⁴ Retoma el tema del petróleo de Guanabacoa en el año de 1863 con un informe sobre el estado actual y el porvenir de la mina de Asfalto Santa Rosa, Guanabacoa. En el mismo, se detallan los aspectos geológicos de la mencionada mina de asfalto que encontraba en explotación, con mayor intensidad a mediados del siglo XIX.⁵ Dentro de la lista de productos expuestos en la Gran Exposición Universal de 1867, catalogada por Fernández de Castro, se encuentran dos grandes muestras de asfalto provenientes de la mina Abeja en Bacuranao, Guanabacoa. La documentación refiere que se produce petróleo líquido de una perforación artesiana que tiene 83,8 metros de profundidad. En otra perforación, en la vecina mina Santa Teresa, hasta los 150,9 metros de profundidad, por las noches suele verse encendido el gas que brota del pozo.⁶

En 1870, una botella de petróleo extraída en un pozo al sur de Varadero, fue el centro de largas discusiones en la Academia de Ciencias, que se extendieron por varios meses, incluida la evaluación general sobre el potencial de Cuba para petróleo y gas. En la Academia, junto a su hermano José, se van a debatir tanto el hallazgo, como la geología del petróleo en Cuba.⁷ Ambos consideran que la abundancia de sus manifestaciones en la isla es un índice de un apreciable potencial y que estos combustibles fósiles pudieran jugar un rol importante en la industria azucarera. En casi todo el interior y el litoral de la Isla, señaló que se encuentran derrames de chapapote más o menos abundante, más o menos fluido. Por consiguiente,

recomienda que se debieran realizar trabajos en busca del petróleo. Subraya que es perspectivo todo el terreno serpentínico comprendido entre Regla y Guanabacoa; a lo largo de la costa norte de la Isla, desde la Habana hasta más allá de la bahía de Cárdenas; en las jurisdicciones de Guanajay, Bahía-Honda y Mantua; en Jaruco, en Cienfuegos, en Villa Clara, en Holguín y en Mayarí.

Minerales no metálicos.

En 1863, Fernández de Castro publica varios estudios sobre las minas de yeso.⁸ También sobre yacimientos de calizas utilizables para la producción de cal viva, un importante producto para la industria azucarera, pues se emplea como “defecante” del guarapo, para mayor rendimiento de azúcar y trata de precisar, en sus justos limites, las propiedades inherentes a estas calizas.⁹

Cobre

Publicó varios artículos sobre minas de cobre en la parte oriental de Cuba y en Pinar del Río.¹⁰

Oro

Manuel Fernández de Castro produce una enjundiosa memoria sobre el oro en Cuba. El voluminoso estudio toca los yacimientos en placeres y en la roca, en el ejemplo de San Blas de las Meloneras en Guaracabuya y en Holguín¹¹, así como el oro presente en aluviones.¹²

La conexión de Cuba con el continente

Alexander von Humboldt (1769-1859), Ramón de La Sagra (1798-1871) y Felipe Poey (1799-1891) se habían referido en sus obras sobre la unión de Cuba al continente. Pero, sin lugar a dudas, Fernández de Castro fue el más consecuente divulgador de la teoría. Consideraba que Cuba había formado parte del continente americano en un periodo geológico no muy lejano, entre finales del Terciario y el comienzo del Cuaternario, mientras que la época anterior había estado casi toda ella, cubierta por el mar. Se apoyó para ello en la descripción de restos de grandes mamíferos que necesitaban un puente terrestre para llegar a la isla.¹³ Se trataba de dientes y molares fósiles identificados por Fernández como de un équido, colmillos de hipopótamo y la mandíbula de un mamífero

del orden de los roedores o de una especie del género *Megalonix*. El 10 de julio de 1864 hace su primera presentación en la academia habanera¹⁴, un artículo en la Revista Minera¹⁵, ampliada en una monografía de 1871 que incluye argumentos adicionales sobre algunos aspectos polémicos. En la memoria paleontológica afirmaba: "Es, pues, un hecho incontestable que el territorio de Cuba formó parte del continente cuando en él se encuentran perfectamente conservados los restos de hipopótamos, caballos y edentes contemporáneos del *Megaterio*, que, según unos, vivieron en la última época de los terrenos terciarios, y según otros en la cuaternaria o postpliocena."¹⁶ Tanto los fósiles como las conclusiones que se derivan de su existencia en Cuba, fueron el centro de discusiones especialmente con el científico norteamericano Joseph Leidy (1823-1891).¹⁷ Otro paleontólogo que estudio los fósiles fue el francés Auguste Pomel (1821-1898), quien propuso para el perezoso fósil el taxon *Myomorphus cubensis*, subgénero del *Megalonix*¹⁸, pero puso en duda que los colmillos de hipopótamo fueran fósiles.

Después de su regreso a España, Fernández de Castro publicó una extensa recopilación y compilación de los datos geológicos y paleontológicos existentes, tanto de sus propios trabajos como de las obras y colecciones de investigadores como: Humboldt, Taylor, Galeotti, Ramón de la Sagra, d'Orbigny, Justo Egozcue y Cía, Felipe Poey, Nicolás J. Gutiérrez y Henry Chateau, entre otros.¹⁹ En su último discurso solemne leído en La Academia de ciencias de La Habana (28 de abril de 1872) Fernández de Castro presento el diente fósil de una raya gigante de secuencias del terciario con un estudio del taxon que denominó *Aetobatis poeyi*.²⁰

El croquis geológico de Cuba.

El primer mapa geológico de Cuba, que sirvió de base a muchos estudios posteriores, fue publicado en 1869, confeccionado por Manuel Fernández de Castro y Pedro Salterain y Lagarra. Se considera que este mapa como una obra de gran trascendencia para las ciencias geológicas cubanas, en la segunda mitad del siglo XIX. El mismo fue empleado durante décadas como fuente indispensable

para el conocimiento geológico del país. Durante más de veinte años los dos geólogos españoles van a publicar diversos artículos y relatorías relacionados con el mapa.²¹ De gran impacto fue su presentación en el Congreso Internacional de Americanistas en 1881.²² En 1883 se publica trazado sobre la gran Carta geográfica

enciclopédica y tres años, después aparece publicado en el Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España.²³ El Ministerio de Ultramar le había encargado a Fernández de Castro “arregle y clarifique las rocas y fósiles recogidos en las islas de Cuba y Santo Domingo, y coordine en una



memoria los datos históricos y científicos”.²⁴ No llegó a concluir la gran memoria que le encomendaron.²⁵

Meteorología

En un libro sobre meteorología, Fernández de Castro profundiza sobre la teoría, causas, época y frecuencia de los ciclones tropicales, con especial atención al catastrófico evento meteorológico de octubre de 1870, donde solo en la ciudad de Matanzas perdieron la vida unas de 800 personas. La publicación tuvo una gran resonancia, principalmente en España, donde recibió un reconocimiento especial por parte de la Marina de Guerra.²⁶

Acueductos y alcantarillas

Es un tema abordado en el Diario de la Marina durante varios años, en decenas de artículos.²⁷ La evacuación de las aguas pluviales y albañales de la ciudad con pozos absorbentes, así como, la forma de mantener el buen estado de las vías se repite en varios trabajos.²⁸ A destacar

una serie de 22 artículos publicados en 1861 sobre inundaciones y sequías.

En varias ciudades de Cuba llevó a cabo investigaciones para garantizar la calidad del abastecimiento de agua comenzando por el acueducto de la Habana en un informe junto a otros geólogos y químicos.²⁹ Estudios similares se llevaron a cabo para los acueductos de Cienfuegos³⁰ y Cárdenas³¹, en esta última localidad sobre el aprovechamiento del abundante manantial que existe en las inmediaciones de las canteras de Teide, a 4 000 varas de la población.

República Dominicana

Tras la tercera anexión de Santo Domingo a España, Fernandez de Castro recibe la encomienda del Capitán General de Cuba, Francisco Serrano (1810-1885), para que estudiase sus recursos minerales potencialmente desarrollables. Se trataba de describir el distrito metalífero de cobre en San Cristóbal, las minas de oro y plata de la Cordillera Central, los criaderos de hierro

magnético de Maimón y los lignitos de Yanigua y Samaná. Durante seis meses va a recorrer el terreno en difíciles condiciones. Finalmente redacta una voluminosa y bien documentada memoria, en tres tomos, remitida al Ministerio de Ultramar, donde se archivó.³² La suerte del voluminoso reporte fue infausta, la comisión encargada de evaluarlo consideró que no había cumplido con lo encomendado y que era demasiado extenso para ser publicada. Ya para entonces Santo Domingo había dejado de pertenecer a España y dejó de ser de interés para la Administración.

Edafología

Un tema recurrente es lo relacionado con la tierra colorada que constituye buena parte de los terrenos de cultivo de la Isla de Cuba. En estos trabajos analiza los procesos que llevan a la formación de estas tierras sobre formaciones calcáreas en contraposición a la opinión aparecida en los Estados Unidos, de que en los países azucareros los principales suelos son de origen volcánico.³³ En dos publicaciones caracteriza las tierras para el establecimiento de la Escuela Cubana de Agricultura.³⁴

1872 – 1895. Regreso a España.

El año 1872 regresó a su patria, donde tomó posesión de una plaza en la Junta Superior Facultativa de Minería y un año después paso a ocupar la dirección de la Comisión del Mapa Geológico de España. Desempeñó esta labor durante más de veinte años. Dicha comisión había sido establecida en 1849, pero languideció con los años. El escaso respaldo económico y legal hacía temer un nuevo fracaso, que Fernández de Castro logro evitar con un nuevo decreto, de Amadeo de Saboya (1870-1873). Entre 1873 y 1894 se elaboraron y publicaron múltiples mapas geológicos provinciales a escala 1:400 000. Entre 1889 y 1892, se concluyó el primer mapa geológico detallado de toda la península, un trabajo que no se limitaría al estudio de la geología, abarcando también aspectos topográficos, meteorológicos, botánicos y zoológicos. Los trabajos geológicos de La Comisión del Mapa Geológico de España fueron premiados en las exposiciones internacionales de Filadelfia (1870), Paris (1889) y Chicago (1893).

Fernández de Castro consideraba importante el establecimiento de relaciones estrechas con la Escuela de Ingenieros de Minas. Promueve una Orden Ministerial para que los profesores de geología, química analítica, y mineralogía, formasen parte de la Comisión Ejecutiva del Mapa Geológico. Otra iniciativa de gran repercusión fue la publicación de una bibliografía geológico-minera hispanoamericana para los años de 1492 a 1892, en dos tomos: uno de biografías y otro de bibliografía. El de biografía estaba dividido en dos volúmenes: de la A a la L, y de la M a la Z.³⁵ Inició en 1874 la publicación del "Boletín de La Comisión del Mapa Geológico de España" que se sigue publicando con el nombre de "Boletín Geológico y Minero".

Su relación con Cuba tuvo otra magnitud al ser elegido en 1879 senador y reelegido por otras cuatro legislaturas, en representación de la provincia de Santa Clara, participando activamente en la elaboración de varias leyes, entre ellas, la de la abolición de la esclavitud y de otros muchos asuntos de la importancia para la minería.

Fueron muchos los honores y distinciones concedidos a Fernández de Castro, quien nunca estuvo afiliado a partidos políticos. Miembro numerario de La Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de La Habana, del Consejo Superior de Agricultura, del Consejo de Instrucción Pública, de La Junta Consultiva del Instituto Geográfico y Estadístico, Académico numerario de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y de La Academia de Ciencias de Barcelona. Fue presidente de la Real Sociedad Española de Historia Natural, y miembro de las juntas directivas de las sociedades Geográfica de Madrid y Antropológica de la Isla de Cuba. Es elegido Académico Numerario el 9 de junio de 1876.

Recibió varias importantes condecoraciones como: La Gran Cruz de Isabel la Católica, la Cruz y encomienda de Carlos III, la Cruz de la Legión de Honor Francesa, la placa de segunda clase del Merito Naval, concedida por el Ministerio de Marina, la Gran Cruz de María Victoria, y la Encomienda portuguesa del Cristo.

Cuando pensaba continuar la publicación de las memorias geológicas provinciales y mejorar algunas de las ya

editadas, comienza la pérdida de energía de Fernández de Castro, lo cual paralizó sus planes. Este quebrantamiento de su salud se acelera en octubre de 1894, tras el fallecimiento de María Josefa, su esposa. En definitiva, pocos meses después fallece en Madrid, el martes 7 de mayo de 1895, dejando una enorme obra científica y social que aun honra su memoria.

Bibliografía pasiva

Biografía del Excmo. Sr. Manuel Fernández de Castro (1825-1895) Elaborada por Juan Antonio Vera Torres, Académico Numerario de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y Catedrático de Estratigrafía de La Universidad de Granada (mayo 2006)

Documentación del Excmo. Sr. Manuel Fernández de Castro (1825-1895) Recopilada por Juan Antonio Vera Torres, Académico Numerario de La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y Catedrático de Estratigrafía de La Universidad de Granada (mayo 2006) Madrid. Ciencia y Sociedad: Manuel Fernández de Castro <http://www.madrimasd.org/cienciaysociedadlpatrimonio/personajes>

Mallada, L. 1895 “Excmo. Sr. D. Manuel Fernández de Castro”. Revista Minera, Metalúrgica y de Ingeniería Madrid: 1895. Tomo XLIV de su Publicación y XIII de la Serie C — Enrique Teodoro, Impresor Amparo. 102, y Ronda de Valencia, 8. mayo de 1895.

¹Rábano, I. 2006. “Casiano de Prado y Manuel Fernández de Castro: relación epistolar entre 1859 y 1866”. Boletín Geológico y Minero, 117 (3): 423-440.

²Fernández de Castro, M. 1864. “Nueva legislación de minas en Cuba”. Diario de la Marina. serie de 4 arts., julio de 1864.

³Fernández de Castro, M. 1864. “Tramitación de los expedientes de minas”. Diario de La Marina, serie de 6 artículos. 1864.

⁴Fernández de Castro, M. 1859 “Nota sobre una mina de asfalto en las inmediaciones de la Habana”. Revista Minera. Madrid. Tomo XI. 1859.; Fernández de Castro, M. 1860. “De un informe sobre el estado actual y el porvenir de la mina de asfalto Santa Teresa, Guanabacoa, Cuba”. Revista Minera, Madrid, 11: 618-621. 1860.

⁵Fernández de Castro, M. 1863. "Informe sobre el estado actual y el porvenir de la mina de asfalto Santa Rosa, Guanabacoa, Cuba". 1863.

⁶Fernández de Castro, M. 1867. “Catálogo productos expuestos por Cuba en la Gran Exposición Universal de 1867”. Comisión Regia de España, 1867.

⁷Documento 1764 de la Real Academia de la Habana – “Del petróleo y del chapapote considerados como combustibles”. Mayo 8, 29, junio 12, 1870. Discusión, 7:301-02, 307, 311, 519-27, 575-82, 615-24, 1870-71. Discusión 8:106-08, 195-200, 289-99, 1871 Anales de la Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana. Revista Científica Directores Antonio Mestre y Felipe Rodríguez Tomo VII. Imprenta La Antilla de Cacho – Negrete. Calle Cuba No. 51.

⁸Fernández de Castro, M. 1863. “Del yeso y el hierro oxidado en Cuba”. Anales Soc. Econ. Habana. Revista Forestal Habana. Cuba. 1863.; Fernández de Castro, M. 1863. “Del yeso y hierro oxidado de Cuba”. Diario de la Marina. Habana, 1863

⁹Fernández de Castro, M. 1866. “Sobre las propiedades de la cal quemada, del potrero Marañón”. Artículos publicados en el Diario de la Marina de 11 y 13 de febrero de 1866

¹⁰Fernández de Castro, M. 1863. “Fundición de cobre en Mantua”. Diario de La Marina 29 de julio de 1863.

¹¹Fernández de Castro, M. 1864. “Estudio sobre las minas de oro de la Isla de Cuba y muy particularmente sobre la de San Blas de las Meloneras en el partido de Guanacabuya, jurisdicción de Remedios”. Habana, 1864. Imp. y librería «El Iris» En 4º, 104 pag. Una lám. y grabs. en el texto; Fernández de Castro, M. 1865. “Estudio sobre las minas de oro de la Isla de Cuba y muy particularmente sobre la de San Blas de las Meloneras en el partido de Guanacabuya, jurisdicción de Remedios”. Gaceta de Madrid, de los días 20, 21, 22, 24, 26, 28 y 28 de noviembre de 1865; Fernández de Castro, M. 1864. “Estudio sobre las minas de oro de la Isla de Cuba y muy particularmente sobre la de San Blas de las Meloneras en el partido de Guanacabuya, jurisdicción de Remedios”. Anales de la Real Acad. de Ciencias, Méd. Físic. y Natur. de la Habana, i. I., págs. 171, 205, 255, 301, 356 y 404, 1864.

¹²Fernández de Castro, M. 1865. “Aluviones auríferos. Entre los cayos y el litoral de la región central de la Isla de Cuba”.

¹³Pelayo, F. 1995. “La conexión terrestre entre Cuba y el continente americano: una alternativa paleontológica a la deriva continental”. Revista española de historia de las ciencias de la naturaleza y de la tecnología. Historia de la Biología. Facultad de Biología. Universidad Complutense de Madrid. DL: M-34954-1995. ISSN: 1136-2049. 1995. Vol I. Artículo nº 4.

¹⁴Fernández de Castro, M. 1865. “De la existencia de grandes mamíferos fósiles en la isla. de Cuba”, Memoria leída en la Academia de Ciencias médicas físicas y naturales de la Habana. en la sesión del día 10 de Julio de 1864. Por el Inspector general de 2a clase del

Cuerpo de Ingenieros de minas D. Manuel Fernández de Castro, Habana: Imprenta y librería “El Iris” Obispo 22. 1865. En 4º, 31 págs. Y un atlas de 13 láms.

¹⁵Fernández de Castro, M. 1865. “De la existencia de grandes mamíferos fósiles en la Isla de Cuba”. Revista Minera, Madrid, 16, pág. 161-178. 193-210. 1865.

¹⁶Fernández de Castro, M. 1871. “De la existencia de grandes mamíferos fósiles en la Isla de Cuba (2a parte)”. Madrid. 1871. Imp. de J. M. Lapuente. En 4º, 30 págs.

¹⁷Leidy, J. 1868. "Notice on some vertebrate fossils from West Indies" Proceedings of the Academy of Natural Science of Philadelphia, volumen XV. 1868.

¹⁸Fernández de Castro, M. 1870. “Paleontología. El *myomorphus cubensis*, nuevo subgénero del *Megalonix*”. Anales de la Real Academia de Ciencias de La Habana, t. VII. 1870, pp. 436-656 y "Paleontología. El *Myomorphus cubensis*, nuevo subgénero del *Megalognyx*" Revista Minera, t. XXII, 1871, p. 165-178 y 190-205

¹⁹Fernández de Castro, M. 1876. “Catálogo de los fósiles de la Isla de Cuba”. Anales de la Academia de Ciencias de la Habana, 13: 320-326. 1876.

²⁰Fernández de Castro, M. 1872. “*Aetobatis poeyi*, nueva especie fósil procedente de la isla de Cuba”. Anales de la Academia de Ciencias de la Habana, 10, pág. 368-374, 1872.; Fernández de Castro, M. 1870. “Nota sobre un diente placoides fósil de la isla de Cuba, el *Aetobatis poeyi*”. Anales de la Academia de Ciencias de la Habana, 8, pág. 643-645. 1870.; Fernández de Castro, M. 1872. “Diente de planoida fósil de La isla de Cuba, que parece ser una especie nueva del género *Aetobatis*”. Imp. J. M. Lapuente, 30 pp., 2 lams. Madrid, 1872.

²¹Fernández de Castro M. 1872 “Nota o rápida ojeada sobre la constitución geológica de la Isla de Cuba”, En Crónica de Cuba el Sr. D. Jacobo de la Pezuela. 1872.; Fernández de Castro, M. 1876. “Descripción geológica de La isla de Cuba”. Rubio Grillo Vitturi. 48 pp., 1 mapa. Madrid, 1876.

²²Fernández de Castro, M. y Salterain P. 1881. “Constitución Geológica de la isla de Cuba”. IV Congreso de Americanistas de 1881. Madrid.

²³Fernández de Castro, M. y Salterain P. 1884 "Croquis Geológico de Cuba" Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España, X, 1884

²⁴AHN, Ultramar, 227, exp. 7

²⁵Rábano, I. 2016. “Las investigaciones geológicas y mineras de Manuel Fernández de Castro en Cuba y Santo Domingo (1859-1869)”. IX Congreso Geológico de España Geo-Temas, 16 (2) ISSN 1576-5172 247 pag. 247-250

²⁶Fernández de Castro, M. 1871. “Estudio sobre los huracanes ocurridos en la isla de Cuba durante el mes de octubre de 1870. Precedido de algunas cooperaciones sobre la teoría, causas, época y frecuencia de estos meteoros” Imp. J. M. Lapuente. Calle de Nobleja. núm. 5. cuarto bajo 488 pp., 4 Lams. Madrid, 1871.

²⁷Fernández de Castro, M. 1865. “Desagües de la Habana por medio de pozos absorbentes”. Artículo publicado en el Diario de la Marina en 26 de Julio de 1865.; Fernández de Castro, M. 1865. “Algunas observaciones sobre los diferentes sistemas de empedrados y afirmados de calles”. Diario de la Marina serie de 20 artículos, 1865.

²⁸Fernández de Castro, M. 1860. “Los desagües de la Habana por medio de pozos absorbentes”. Diario de la Marina del 2 y 19 de agosto de 1860.; Fernández de Castro, M. 1861. “Empedrados y desagües de la Habana”. Serie de cinco artículos publicados en el Diario de la Marina el 19 de sept. de 1860, 21 y 27 de jun., 3 y 17 de jul. de 1861.

²⁹Fernández de Castro, M., Valdés, N., Ruiz León, J., Aenlle J. y Salterain P. 1863. “Informe que se presenta al Excelentísimo Sr. Gobernador, Capitán general de la isla de Cuba, la comisión nombrada para inspeccionar las obras del canal de Isabel II, proyectado por D. Francisco Albear, con objeto de conducir a la Habana las aguas de los manantiales de Vento”. 70 págs. 1 lám 1863. Manuscrito. Mem. XX, 1.a (20). 1863; Fernández de Castro, M., Valdés, N., Ruiz León, J., Aenlle J. y Salterain P. 1864. “Informe de La Comisión nombrada para inspeccionar las obras del Canal de Isabel II, proyectado por D. Francisco de Albear, con objeto de conducir a La Habana las aguas de los manantiales de Vento”. Imp. Viuda de Antonio Yenes. Madrid, 1864. En 4º, 64 págs y una lámina.

³⁰Fernández de Castro, M. 1866. “Sobre el abastecimiento de aguas a La población de Cienfuegos”. Diario de la Marina, 24 de mayo de 1866.

³¹Fernández de Castro, M. 1866. “Sobre el abastecimiento de aguas a La Villa de Cárdenas”. Diario de La Marina, 29 febrero de 1866.

³²Fernández de Castro, M. 1862. “Estudios geológicos y geográficos de la isla de Santo Domingo, con datos para su historia económico-industrial. Tres tomos manuscritos con 6 planos geológicos y topográficos y un mapa general de la isla, entregados a los archivos del Ministerio de Ultramar, 30 de octubre de 1862.; Fernández de Castro, M. 1862. “Nota sobre la geología de Santo Domingo, leída en la Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana en la sesión del día 10 de agosto de 1862”. Diario de la Marina del 29 de agosto y números de septiembre de 1862.; Fernández de Castro, M. 1863. “Extracto del informe acerca de Santo Domingo, sus producciones, historia natural y especialmente de la mineralogía. Diario de la Marina 13 de febrero de 1863.

³³Fernández de Castro, M. 1860. “Formación de la tierra colorada que constituye gran parte de los terrenos de la Isla de Cuba”. Revista Habanera. 1860.; Fernández de Castro, M. 1871. “Sobre la formación de la tierra colorada que constituye gran parte de los terrenos de cultivo de la Isla de Cuba”. Revista Forestal, t. IV. Madrid, junio de 1871, págs. 289 a 300.

³⁴Fernández de Castro, M. 1865. "Informe con motivo del reconocimiento del potrero de Ferro, para el establecimiento de la Escuela de Agricultura". Diario de la Marina. 20 de mayo de 1865.; Fernández de Castro, M. 1920. "Informe dado con motivo del reconocimiento del potrero Ferro para el establecimiento de la escuela de agricultura". Boletín de Minas, 6: 33-38; Fernández de Castro, M. 1865. "Informe con motivo del reconocimiento del potrero Toledo, para el establecimiento de la Escuela de Agricultura" Diario de la Marina 20 de septiembre y 6 de mayo de 1865

³⁵Maffei E. y Rua Figueroa R, 1871 "Biblioteca Española de libros, folletos y artículos, Impresos y manuscritos, relativos al conocimiento y explotación de las riquezas minerales y a las ciencias auxiliares, concernientes a la península y a nuestras antiguas y actuales posesiones de ultramar". Madrid: imprenta de J. M. Lapuente, calle de Moblejas, numero. 3, cuarto bajo. 1871



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

Jose Fernández de Castro y Suero: 1833 - 1873

José Fernández de Castro Suero nació en Santiago de Cuba el 20 de mayo de 1833, hijo de D. Felipe Fernández de Castro y Manuela Suero. El matrimonio tuvo dos hijos: Manuel, nacido en Madrid, y José, ambos con destacada actividad en la geología y la minera cubana, así como, notables divulgadores de las ciencias naturales y su aplicación. El matrimonio regreso a España cuando José era muy pequeño, donde se educó.

José Fernández de Castro escribió sobre minería, geología, agricultura, física, metalurgia, química, ferrocarriles, etc. Su actividad principal estuvo inicialmente relacionada con la minería y más tarde con las ciencias agronómicas. Hombre dado a los estudios serios y, sobre todo, a las ciencias naturales y abstractas, fue miembro de la Real Academia de Ciencias de la Habana, desde 1868. Desde 1866 fue el redactor científico del Diario de la Marina de La Habana.

En Cuba

José Fernández de Castro llega a Cuba dos años antes que su hermano Manuel, para asumir el cargo de Auxiliar facultativo del cuerpo de ingenieros de minas. En aquellos momentos, el servicio de minas solo contaba con un inspector: Juan Diego López Quintana. Se embarcó en Cádiz, el 12 de mayo de 1857. Fue designado a trabajar en el Departamento Oriental donde se estaban reactivando varias minas, principalmente la Mina Grande de Santiago del Prado en El Cobre.

En 1962, publicó en el Diario de Santiago de Cuba un Informe sobre el estado de la industria minera en el departamento Oriental.¹ El diario santiaguero publica otros artículos relacionados con la metalurgia del yacimiento de cobre en Mantua², sobre el análisis espectral³ y otros de divulgación científica.⁴

A partir de 1865 se instala en la Habana donde trabaja en el Diario de la Marina que dirigía su hermano Manuel. Los primeros artículos sobre temas generales aparecen en



1965⁵. En años posteriores, va a publicar decenas artículos sobre los temas más variados. Con relación a la minería, se manifiesta sobre los derechos de maquinaria importada⁶, sobre el estado de las minas de El Cobre⁷, la minería en la exposición mundial de 1867, los minerales auríferos en la región de Holguín⁸ y otros

En diciembre de 1868 obtiene un asiento en la Real Academia de Ciencias Médicas Físicas y Naturales de La Habana con un discurso sobre la unidad de la materia⁹. Comienza entonces una nueva etapa en su actividad científica, publicando decenas de artículos y participando en discusiones sobre temas diversos, sobre todo los relacionados con la geología y la minería en Cuba y en el mundo. Entre otros, destacar la metalurgia del oro¹⁰, las empresas involucradas en la extracción de cobre¹¹, las minas y los ferrocarriles¹².

De particular relevancia fueron los artículos y discursos en varias sesiones de la Academia de ciencias en los años 1869, 1870, 1871 y 1872 sobre el petróleo, el asfalto y su industria. El tópico se fue desarrollando desde la idea inicial de utilizar el petróleo en la industria azucarera para desechar la práctica de quemar madera y bagazo¹³. La

cuestión era transversal a toda la economía de la isla por lo que la Academia solicitó a José y a Manuel Fernández de Castro ampliar el tema¹⁴. En sus conferencias, Don José considera que el origen del asfalto natural (conocido en Cuba como chapapote) está en la nafta, la cual va tomando consistencia según ciertas condiciones. Disertó ampliamente ante la Academia en sesiones del 8 y 29 de mayo y del 12 de junio de 1870, resaltando la potencial importancia del asfalto y el petróleo para el país. Las áreas de Cuba productoras de asfalto en Cuba en esos momentos eran: el Mariel, Bacuranao y Jaruco. La roca encajante es también diferente: desde arenas calcáreas del Terciario, hasta calizas compactas y serpentinitas. Don José demuestra que el asfalto y el petróleo son en principio una misma sustancia y tienen un mismo origen (orgánico) y que, dada la abundancia de sus manifestaciones en Cuba, tanto el asfalto como el petróleo líquido podrían jugar para Cuba un rol importante como combustible para la industria “dado que la isla carece de otro combustible fósil o mineral”.¹⁵

Para demostrar que el petróleo y el asfalto tienen un mismo origen Fernández de Castro argumenta: “los caracteres exteriores del chapapote que se extrae en la bahía de Cárdenas demuestran que ese asfalto se encontraba antes en estado pastoso”. En toda la zona norte de Cuba tenía potencial para descubrir yacimientos de petróleo porque “.... si todo indica que no existe verdadera diferencia entre él (el asfalto) y el petróleo, su importancia en Cuba es tanto más grande cuanto que según datos fidedignos ocupa un zona de ciento cincuenta leguas de largo por veinte de ancho en algunos puntos.” y apunta “ En Cuba, ya se ha visto, el chapapote sólido y líquido, o sea el asfalto y la brea mineral, se encuentran bien en la roca denominada serpentina, que la generalidad de los geólogos tiene por plutónica, o en terrenos calizos, margosos y arcillosos que han sido clasificados como terciarios. En todo el terreno serpentínico (sic) comprendido entre Regla y Guanabacoa y en los alrededores de esta última población; en la costa norte de la Isla; desde la Habana hasta más allá de la bahía de Cárdenas; a tres y a seis leguas de aquella en dirección

Este; en las jurisdicciones de Guanajay, Bahía-Honda y Mantua; en Jaruco, en Cienfuegos, en Villa Clara, en Holguín, en Mayarí; en una palabra, en todo el interior y el litoral de la Isla, desde el cabo de San Antonio hasta la punta de Maisí, se encuentra el chapapote más o menos abundante, más o menos fluido: en toda ella, por consiguiente, debieran establecerse trabajos en busca del petróleo, o, a lo menos, labores de beneficio sobre los criaderos de brea mineral, más preciosa aun considerada como combustible, que se tienen ya descubiertos”.¹⁶

Las discusiones sobre el petróleo cubano se retoman en 1872, en sesiones de la Academia de Ciencias del 12 de mayo y el 15 de julio, por la presentación por parte del Doctor Don Ambrosio González del Valle de un informe y muestra de petróleo (chapapote líquido) que días antes se había extraído en una hacienda al Sur de Varadero, jurisdicción de Cárdenas.¹⁷ La muestra había sido tomada en un pozo artesanal, labrado para la búsqueda de agua, a 46 varas (unos 37 m) de profundidad. El terreno, según su informe, es quebrado y pedregoso y de las excavaciones se sacaron rocas azules y verdes. La descripción de las rocas extraídas del pozo indica que son de superficie lustrosa y el color verdoso se oscurece cuanto más se profundizaba el pozo. El dueño refiere haber sacado de 30 a 40 cubos de crudo sin que se notase merma del material que allí brotaba. Gonzales del Valle remite unos pedazos de piedra que deja a disposición de la Academia. En la Academia, Don Manuel y Don José Fernández de Castro opinan ampliamente sobre el hallazgo, resaltando que la muestra presentada por el Dr. Valle es notable por su fluidez, pues lo común es encontrar el chapapote mucho más viscoso.

José Fernández de Castro falleció en la Habana en 1873. En el 1876, su hermano Manuel comenzó en Madrid, la publicación post mortem de sus obras, de que se dio un tomo, impreso en 8º, con 526 páginas, y contiene Discursos académicos, Agricultura e Industria azucarera y se ofrecen los otros tres tomos divididos de esta manera: Tomo 2, Minería y Metalurgia, Química, Aguas, Combustibles y Alumbrado: Tomo 3, Caminos de hierro, Telegrafía submarina, Policía Urbana y Obras Municipales, Miscelánea: Tomo 4, Exposición Universal de 1867.¹⁸

¹Fernández de Castro José 1862, Informe sobre el estado de la industria minera en el departamento oriental de la isla de Cuba. Diario de Santiago de Cuba. 5 de nov. de 1862.

²Fernández de Castro José Metalurgia del cobre. Diario de Santiago de 31 de dic. De 1862, 10 y 31 de enero y 13 de febr. de 1863.

³Fernández de Castro José. 1963. Análisis espectral. Diario de Santiago de Cuba de 16 - 19 de septiembre de 1863.

⁴Fernández de Castro José 1864. Dos metales nuevos. Diario de Santiago de Cuba de 12 de febr. de 1864; Fernández de Castro José Extracción del talio. Diario de Santiago de Cuba de 25 de febr. de 1864.

⁵Fernández de Castro José. 1865, Túnel del Monte Cenía. Diar. de la Mar. Habana, 1865, 15 de Julio.; Fernández de Castro José Sobre el abasto de aguas de la Habana. Diar. de la Mar. de 20 de agosto; 15, 17, 18 y 19 de oct. de 1865 y 2, 16, 20 y 25 de octubre de 1866.; Fernández de Castro José Observaciones sobre el huracán que experimentó la Habana en octubre de 1865. Diario de la Marina. 24 de oct. de 1865.

⁶Fernández de Castro José Examen del decreto declarando libres de derechos arancelarios las máquinas importadas en Cuba, que faciliten la explotación de propiedades rústicas. Diar. de la Mar. de 2 y 6 de enero de 1866.

⁷Fernández de Castro José SOBRE la situación desventajosa en que se encuentran las minas de cobre de la villa del Prado en Santiago de Cuba. Diar. de la Mar. de 21, 23 de jun., 12 de oct. de 1866, 2 y 7 de febr. de 1867.

⁸Fernández de Castro José. 1868. Sobre los minerales auríferos de Holguín. Diario de la Marina de 7 de febrero de 1868.

⁹Informe sobre candidatos a las vacantes de la Sección de Ciencias: Sres. José Fernández de Castro, Juan Vilaró, Enrique de Arantave y Francisco de Frías y Jacot, julio 28, 1868. Anales de la Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana, Tomo 52:361-62, 1916.; Fernández de Castro José La unidad de la materia. Discurso pronunciado por en su recepción en la Real Academia de ciencias médicas, físicas y naturales de la Habana. Diario de la Marina de 23 de dic. de 1868.; José Fernández-de Castro y Suero. Sobre la unidad de la materia. Discurso de recepción en la Academia de Ciencias, diciembre 13, 1868. Anales de la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana, Tomo 5: 306-24, 1869.

¹⁰Fernández de Castro José. 1869. Metalurgia del oro. Diario de la Marina, de 11 y 12 de marzo de 1869.

¹¹Fernández de Castro José Sobre el estado de las empresas que labran los criaderos de la villa del cobre. Diario de la Marina, de 1º de mayo de 1869.

¹²Fernández de Castro José Las minas y el ferrocarril del cobre. Diario de la Marina de 19 – 23 de enero de 1870.

¹³Fernández de Castro José. 1869. Del petróleo y del chapapote como combustibles. Diario de la Marina de 7-11 de agosto de 1869

¹⁴Fernández de Castro José. 1870. Del petróleo y del chapapote como combustibles. An. de la R. Ac. De ciencias, de la Habana, t. Vil, 1870, págs. 519. 575 y 615.

¹⁵José Fernández-de Castro y Suero. Del petróleo y del chapapote considerados como combustibles. Mayo 8, 29, junio 12, 1870. Discusión, Anales de la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana, Tomo 7: 301 - 02, 307, 311, 519- 27, 575 - 82, 615 - 24, 1870; Fernández de Castro. José, 1970. Del petróleo y del chapapote considerados como combustibles. Anales de la Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana" Revista Científica Directores Antonio Mestre y Felipe Rodríguez Tomo VII. Imprenta La Antilla de Cacho – Negrete. Calle Cuba No. 51. 1870 No. 1764. mayo 8, 29, junio 12, 1870. Discusión, 7:301-02, 307, 311, 519-27, 575-82,615-24, 1870-71. 8:106-08, 195-200, 289-99, 1871. 1870

¹⁶José Fernández-de Castro y Suero. Del petróleo y del chapapote considerados como combustibles. Anales de la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana, Tomo 8: 106-08, 195-200, 289 - 99, 1871.

¹⁷Chapapote líquido. Observaciones por Manuel y José Fernández de Castro, julio 15, 1872. Anales de la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana. Revista Científica. Directores Antonio Mestre y Felipe Rodríguez. Tomo 9:38-39, Imprenta Logrifoull y Dediott. Calle Reilly No 35, 1872; José Fernández-de Castro y Suero. Del combustible en los ingenios, julio 15, 1872. Anales de la Real Academia de Ciencias Médicas, Físicas y Naturales de la Habana, Tomo 9:37-38, -- 1872.

¹⁸José Fernández-de Castro y Suero. Obras. Tomo I o. 1876. Obras de D. José Fernández de Castro. Discursos académicos. Agricultura. Industria sacarígena. Madrid. Imprenta de M- Tello. 1876. -En 8o M. III- 528 ps. Con un prólogo D. Manuel Fernández de Castro.



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

Alfredo Mederos Herrera (1930 – 2025): geólogo, palinólogo, profesor y mentor. Homenaje a un maestro que nunca dejó de evolucionar.

Mariato Castro Mora
notasgeologiavenezuela@gmail.com

Luiraima Salazar-Langer
luiraima.salazar@gmail.com

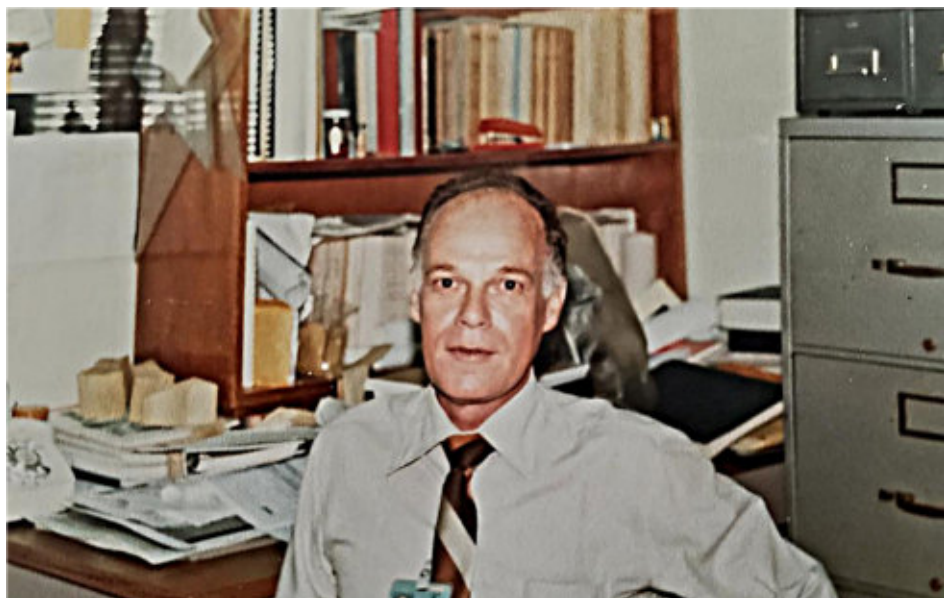


Foto 1: Alfredo Mederos Herrera en su oficina en Lagoven S.A., piso 7, Los Chaguaramos Caracas. Foto tomada por el Departamento de Relaciones Públicas de Lagoven S.A. 1982.

El pasado 2 de agosto, en la ciudad de Caracas, falleció el querido, respetado y admirado geólogo y profesor **Alfredo Mederos Herrera**. Su partida deja un profundo vacío en quienes tuvimos el privilegio y el honor de conocerlo. Maestro nato, por vocación de servicio y apasionado amante de las ciencias de la Tierra, quien destacaba por su habilidad para transmitir sus conocimientos de manera sencilla pero entusiasta, siempre salpicada de humor y ocurrencias que convertían incluso los temas más complejos en una experiencia de aprendizaje agradable y memorable.

Como compañero de trabajo, sobresalía por su bonhomía, calidad humana, capacidad para integrarse e integrar a los equipos multidisciplinarios, afabilidad y su constante disposición para cumplir con las tareas de forma eficiente en un ambiente laboral distendido y cálido.

RAICES Y PRIMEROS AÑOS

Alfredo Mederos Herrera nació en las Islas Canarias, España. Hijo de padre venezolano y madre española. Llegó a Caracas junto con sus padres y hermanos a muy corta edad. Siempre contaba, que sus padres

decidieron dejar España cuando el régimen franquista comenzó a obligar a las familias a inscribir a los niños en las llamadas “*Balillas*” que eran colonias infantiles organizadas durante los tiempos de dictadura del Generalísimo Francisco Franco. La llegada a Venezuela fue dura, como toda familia inmigrante, pero lograron establecerse y llevar una vida feliz donde todos los hijos recibieron educación y posteriormente destacaron en sus respectivas profesiones.

El profesor Mederos se casó muy joven con Ana Melo de Mederos. Tuvo que estudiar y trabajar en algunos casos para levantar su joven familia. Esta es una faceta muy importante en su vida: la familia. Primordial para él, cada paso, cada decisión estaba directamente relacionada con la felicidad y bienestar de los suyos.

VOCACION Y ESTUDIOS DE GEOLOGIA

Se graduó de geólogo en la promoción del año 1957, en la ilustre Universidad Central de Venezuela. Sus compañeros de promoción fueron: Hugo Rosales, Aldo Boccardo, Gregor Ramiroff, Faustino Fortique, Plinio Gamboa, Alí Marcano Battistini, Carlos Ramírez, Jesús Robles, Domingo Ramírez y Gustavo Vásquez Ramírez. Foto 2.



Foto 2: Visita realizada por los estudiantes de geología de noveno semestre de la Escuela de Geología de la Universidad Central de Venezuela a la refinería de Cardón en el Estado Falcón, Venezuela. La visita fue auspiciada por Shell de Venezuela. Foto de Shell de Venezuela 1956. En la foto se puede observar a los estudiantes acompañados de los distinguidos profesores Dr. José Royo y Gómez y la Dra. Frances Charlton de Rivero.

Su tesis de grado se tituló *“Estudio geológico topográfico de una zona en las márgenes del Río Tiznados, Distrito Roscio, Estado Guárico”*.

El área asignada fue de diez kilómetros cuadrados donde textualmente quedo indicado que *“la estratigrafía de los sedimentos está representada por la Formación Ortiz del Paleoceno, por la Formación Arenisca de El Pao del Oligoceno y por los aluviones del Cuaternario. La Formación Ortiz está constituida por una alternancia de capas de arenisca fina, localmente calcáreas, frecuentemente diaclasadas y lutitas de colores que varían del gris oscuro, casi negro, al norte de la zona, al verde oliva, más hacia el sur. La Formación Arenisca de El Pao está representada por interestrificación de areniscas de grano medio a grueso, blancas a cremas, cuando meteorizadas toman colores más oscuros y lutitas arcillosas, de aspecto terroso de colores claros. Los sedimentos depositados por el río y las quebradas constituyen los aluviones cuaternarios. Estructuralmente la parte norte de la región forma parte del flanco sur de un sinclinal, cuyo eje queda más allá del límite norte de la zona, y la Arenisca de El Pao forma un sinclinal volcado, cuyo eje cae más al sur del límite meridional de la zona. Los tres tipos de sedimentos que afloran en el área en estudio se encuentran en contacto discordantes. Las fallas son de dos tipos: longitudinales, cuyo rumbo es más o menos paralelo al de las capas y transversales, con rumbo general noroeste-sureste. Las areniscas en general presentan diaclasas en dos sentidos. La historia geológica de la región es bastante compleja. En el Paleoceno: la sedimentación de Ortiz en el lado sur de la cuenca; luego en la parte inferior y media del Eoceno se produce un levantamiento regional y al final de este período se formaron una serie de fallas normales en dirección este-oeste que determinan una cuenca del tipo semi-graven. Más tarde en el Oligoceno se sedimenta la Formación Arenisca de El Pao y luego durante el Mioceno, la “Cuenca del Orinoco” sufre una regresión hacia el este. El Plioceno es un período intranquilo: se produce la Orogénesis del Caribe que determina empujes horizontales contra el Escudo de Guayana, los cuales volcaron las fallas que formaban la parte norte de la cuenca semi-graven del Eoceno Superior. Y a partir del final del Plioceno y el Cuaternario, la zona ha estado sometida a la erosión. No se encontraron indicios de petróleo ni de yacimientos minerales en la región. Las areniscas no tienen importancia económica, debido al alto porcentaje de hierro en los sedimentos”*.

PRIMEROS PASOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA

El profesor Mederos recién graduado comenzó a trabajar en la Creole Petroleum Corporation (Exxon en Venezuela) y es enviado a estudiar su Maestría en la Universidad de Stanford. Esta oportunidad, la ve el profesor Mederos como única, no tan sólo profesionalmente, sino para su familia.

Durante el verano del año académico 1960-1961, presentó como tesis de grado, para obtener su *Magister*, en la Universidad de Stanford, un estudio basado en el Terciario Inferior de la Montaña del Diablo en California. Este trabajo se fundamentó en las muestras recolectadas por Iván P. Colburn, durante su trabajo de campo para obtener su doctorado, en la misma Universidad y facilitadas por el paleontólogo A. A. Almgren, de la compañía Union Oil Co. de Bakersfield, California. El profesor Mederos al regresar a Venezuela, fue asignado como geólogo de subsuelo en el área de Tía Juana. Realizó trabajos muy esporádicos con nannoplancton calcáreo y la empresa Creole Petroleum Corporation lo desarrolló como palinólogo. He aquí otra anécdota de las ocurrencias y simpatía del profesor Mederos, siempre contaba que cuando la empresa le ofreció desarrollarlo como palinólogo él se alegró muchísimo pensando que estaba relacionado con la cata de licores ya que en Venezuela coloquialmente se le dice al licor “palo” y palinología sonaba a la ciencia de los “palos” (licores).

CARRERA PROFESIONAL Y CONTRIBUCIONES CIENTIFICAS

El profesor Mederos tuvo una larga carrera en la industria petrolera como palinólogo pasando por INTEVEP el Instituto de Investigación y Desarrollo de Petróleos de Venezuela y posteriormente por Lagoven S.A.

Formó parte del equipo de trabajo de Alturitas en Perijá, Foto 3; Estudios Regionales, Foto 7. Participó con entusiasmo y fervor en numerosos cursos, congresos, eventos y tesis de grado de estudiantes de diferentes universidades y centros tecnológicos de Venezuela. Fotos 4, 5, 6, 8 y 9.



Foto 3: Equipo de trabajo de Alturitas, Perijá, liderizado por Carlos Key y con la participación de Orlando Méndez, Max Furrer, Irene Truskowski, el profesor Alfredo Mederos y Marianto Castro Mora. Fotos del año 1979.



Foto 4: Primer Curso de nannoplancton calcáreo del Dr. Nan Park en Venezuela, celebrado en las instalaciones de Meneven S.A. en San Tomé, Estado Anzoátegui, Venezuela en el año 1982. Se observan diferentes participantes de las filiales de la industria petrolera venezolana y el profesor Alfredo Mederos a la derecha de la foto.



Foto 5: Lizaveta Terán y Marianto Castro Mora recibiendo entrenamiento por parte del profesor Mederos. Foto tomada en las oficinas de Lagoven S.A. en 1983.



Foto 6: En la foto de izquierda a derecha Daisy Pérez de Mejía, Alfredo Mederos y Nelly Pimentel de Bellizzia al regreso de la jornada de campo de revisión de las tesis de los cooperantes franceses. Porlamar, Isla de Margarita en el año 1983.



Foto 7: Grupo de Estudios Regionales Lagoven S.A. año 1984, liderizado por Lucas Zamora. En la foto de izquierda a derecha: Eduardo García, Lucas Zamora, Marianto Castro Mora, Lizaveta Terán, el profesor Alfredo Mederos y Max Furrer.



Foto 8: Segundo curso de nannoplancton calcáreo del Dr. Nan Park en Venezuela, 1984, celebrado en las instalaciones de Maraven S.A. en Caracas, contando con la asistencia de todas las filiales de Petróleos de Venezuela. Destacan en la foto en la línea superior de izquierda a derecha: Alejandro Euribe, Maritza Canache, Solangel Alfonzo, Lizaveta Terán, Marianto Castro Mora, Isbelia Durán, Zorena de Monrroy, Estela Di Giacomo, María Antonieta Lorente. En la línea inferior de izquierda a derecha: profesor Alfredo Mederos, Maureen Gallagher y el Dr. Nan Park.



Foto 9: Abriendo Caminos, Departamento de Relaciones Públicas de Lagoven S.A. Año 1994

El profesor Mederos tuvo una importante contribución con el Léxico Estratigráfico de Venezuela brindando la referencia original de las formaciones Tres Puntas, Tigrillo, Caracolito, y los complejos Mejillones, Los Testigos y Bocas, todos ellos costa afuera al norte de la Península de Paria, Venezuela oriental.

- Formación Tres Puntas. <https://mariantoc.github.io/stratigraphy.html#Tres>
- Formación Tigrillo. <https://mariantoc.github.io/stratigraphy.html#Tigrillo>
- Formación Caracolito. <https://mariantoc.github.io/stratigraphy.html#Caracolito>
- Complejo Mejillones. <https://mariantoc.github.io/stratigraphy.html#Mejillones>
- Complejo Los Testigos. <https://mariantoc.github.io/stratigraphy.html#Testigos>
- Complejo Bocas. <https://mariantoc.github.io/stratigraphy.html#Bocas>

Entre sus publicaciones destacan:

- MEDEROS HERRERA, A. 1961. **Lower Tertiary Coccolithophorids and Discoasterids of the Mount Diablo Area, Central California.** The Leland Stanford University, California, United States, August 1961.
- CASTRO MORA, M.; MEDEROS HERRERA, A. A. 1984. **Estratigrafía de la Cuenca de Carúpano (Cuaternario, Neógeno, Paleógeno, Cretáceo, Jurásico).** Informe Interno, Departamento de Geología, Grupo de Estudios Regionales. Lagoven S.A., 52 p.
- CASTRO MORA, M.; MEDEROS HERRERA, A. 1984. **Columna Estratigráfica de Costa Afuera, Venezuela Oriental.** Código Estratigráfico de Venezuela. <https://mariantoc.github.io/correlation.html#Costa%20Afuera>

- CASTRO MORA, M.; MEDEROS HERRERA, A. 1985. **Litoestratigrafía de la Cuenca de Carúpano.** VI Congreso Geológico Venezolano, Memoria 1.
- GIFFUNI, G.; GONZALEZ, C.; LUGO, J.; MEDEROS, A.; ROJAS, P. 1994. **Estratigrafía secuencial de la sección Eoceno (Formación Misoa) en la costa oriental del lago de la Cuenca de Maracaibo.** V Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. 1994. <https://www.acggp.org/v-simposio-bolivariano-exploracion-petrolera-cuencas-subandinas-1994/>
- ROJAS, P.; MEDEROS, A.; CASTRO MORA, M. 1997. **Determinación del Oligoceno en campo sur del Lago de Maracaibo Venezuela.** Boletín de Geología Ministerio de Energía y Minas, Boletín No. 31, Vol. XVIII, 1997. <https://mariantoc.github.io/stratigraphy.html#Oligoceno>

Con estudiantes de computación, brindando sus vastos conocimientos de palinología, como parte de varias tesis de grado, se creó el Sistema Experto SIGPAL, que podía realizar determinaciones rápidas de polen y esporas, pero que tenía como objetivo principal formar nuevas generaciones de palinólogos. Foto 10



Foto 10: Presentación en Intevep S.A. en 1993 del Sistema Experto SIGPAL para determinaciones y entrenamiento de nuevas generaciones de palinólogos. En la foto el profesor Mederos y Marianto Castro Mora con los tesis de computación que desarrollaron el programa.

EL PROFESOR Y MENTOR

La vida de Alfredo Mederos cambió cuando asumió la silla profesoral en el Departamento de Geología de la ilustre Universidad Central de Venezuela al comienzo de la década de los 90. Su vocación de vida como maestro, profesor y docente alegre le hizo redescubrir que podía no sólo transferir sus conocimientos, sino que podía dirigir, guiar, orientar, asesorar, ayudar y motivar a las nuevas generaciones de profesionales venezolanos en las ciencias de la tierra. Manuel Martínez, geofísico lo recuerda como una

gran persona y excelente profesor además de ser un verdadero “influencer”, adelantado a su época, destaca su capacidad pedagógica, unida a su entusiasmo y sapiencia, lograba inspirar a tantos estudiantes de Ingeniería de Petróleo que muchos decidieron cambiarse a Ingeniería Geológica, atraídos por la calidad y profundidad de sus clases.

La silla profesoral tenía una duración inicial de un año, debido a los logros se renovó por un período adicional. Fue entonces cuando tomó la decisión de jubilarse de Lagoven S.A. para entregarse plenamente a su verdadera vocación y misión de vida: compartir sus conocimientos con las nuevas generaciones, con alegría y devoción. Numerosas promociones de geólogos lo eligieron como padrino y llevaron su nombre en homenaje. Todos lo recuerdan con profundo cariño y respeto.

Dictó las cátedras de Geología Física y Geología Histórica, dejando una huella imborrable en generaciones de estudiantes. Durante cuatro años, Luiraima Salazar-Langer fue su asistente en la cátedra de Geología Física, y puede dar fe, con absoluta certeza, de que fue un ser humano excepcional: sabio, generoso, con un fino sentido del humor y una paciencia inagotable.

EL SER HUMANO DETRÁS DEL CIENTIFICO Y PROFESOR

El profesor Mederos dentro de la industria petrolera era impulsor y partícipe de numerosas iniciativas. Alegre, optimista, jovial participaba en los almuerzos musicales de Orlando Méndez. Una manera de compartir la hora del mediodía, bajar las presiones de trabajo y distraernos del quehacer diario. Foto 11.

Amante de la vida al aire libre, participó en diversas disciplinas deportivas y formó parte del equipo de softball del Departamento de Producción de Lagoven S.A. (Foto 12). El reciclaje también ocupaba un lugar importante en las iniciativas de los Departamentos de Producción y Geología de Lagoven S.A., donde el profesor Mederos se destacaba como partícipe y entusiasta de los equipos de trabajo (Foto 13).



Foto 11 : Mediodías musicales, 1979. En la foto de izquierda a derecha Orlando Méndez, profesor Alfredo Mederos, Irene Truskowski, Marvelia Hurtado y Mariano Castro Mora.



Foto 12 : Equipo de softball de Lagoven S.A. año 1979



Foto 13 : Día del reciclaje en Lagoven S.A. El profesor Alfredo Mederos al centro

Más allá de su excelencia académica, Alfredo Mederos poseía una sensibilidad poco común. Tenía la capacidad de percibir el sufrimiento de los demás, incluso cuando no era evidente. En múltiples ocasiones, su labor como docente trascendía a las aulas. Establecía lazos humanos de afecto con estudiantes en situaciones de vulnerabilidad, se interesaba sinceramente por su bienestar y actuaba en consecuencia. Sabía cuándo algo no andaba bien con alguno de ellos, se acercaba, preguntaba interesado, escuchaba con atención y, sin juzgar, ofrecía orientación, apoyo emocional o ayuda concreta.

Un ejemplo real de este compromiso fiel a sus principios, fue el apoyo que brindó a las estudiantes que eran madres jóvenes y que les costaba conciliar entre la vida como mamás y estudiantes. Con empatía y comprensión, les permitió asistir a sus clases obligatorias con sus hijos, quienes, lejos de ser una distracción, se convirtieron en pequeños oyentes fascinados. Esos niños asistían con alegría, entusiasmo y concentración a las clases de Geología Histórica, atrapados por la fuerza de su narrativa y su capacidad para convertir el conocimiento en una experiencia viva. Era impresionante cómo lograba captar su atención y despertar en ellos una genuina curiosidad. Uno de esos niños, que creció entre mapas, fósiles e historias de la Tierra contadas con pasión, es hoy un exitoso economista en Dinamarca.

Es por ello, que fue mucho más que un profesor: fue un director, guía, un mentor y un compañero en los momentos difíciles, para quien era importante que cada estudiante tuviera siempre las mismas oportunidades de estudio. Su legado no sólo se mide por el conocimiento que impartió, sino también por la humanidad, la empatía y el amor con los que lo hizo.

El profesor Mederos dejó una huella profunda en la vida de numerosos profesionales, estudiantes y de todas las personas que tuvieron el privilegio de conocerlo. Su personalidad cálida, abierta y gentil lo hizo formar parte de la vida de sus alumnos y también de sus familias.

Cecilia Hernández, madre de la estudiante Marye León, recuerda que conocer al profesor Mederos fue un verdadero lujo y un placer. Lo describe como un ser humano incondicional, amigable y cercano, con quien era fácil establecer lazos afectivos. Su hija lo eligió para imponer su medalla en su graduación como Ingeniera Geóloga, y también lo invitó a compartir otro momento muy especial de su vida: su boda. Mederos asistió con entusiasmo y disfrutó de la celebración con su alegría habitual. Foto 14.



Foto 14: Boda de su alumna Marye León hace 14 años. Foto cortesía de Cecilia Hernández.

Como mencionamos anteriormente, el profesor Mederos tenía una familia hermosa y siempre se sintió bendecido por sus cuatro hijas. Era común escucharlo hablar con profundo respeto y admiración sobre su esposa, hijas, suegra, hermana, sobrinas, compañeras de trabajo y estudiantes. De ahí su genuino respeto por todas las mujeres que formaban parte de su vida; aunque nunca se definió como feminista, su actuar coherente lo reflejaba plenamente.

Frecuentemente se le escuchaba decir, cuando ayudaba a una estudiante o compañera, que su mayor tesoro era su familia, especialmente sus hijas, y siempre expresaba el deseo de que en la vida ellas encontraran a alguien que siempre las apoyara, por esa razón era tan solidario con todas las mujeres de su entorno cercano. Foto 15



Foto 15: Familia Mederos, su esposa Ana Melo de Mederos “Ona” para sus nietos y bisnietos; de izquierda a derecha Angela “Gela”; Ana María; Alicia “Tita”; Adriana “Gigi” y el profesor Alfredo Mederos “Bili” para sus nietos y bisnietos



Foto 16: Alfredo Mederos en el Hallacazo en Houston con compañeras de trabajo de Petróleos de Venezuela, Janize Méndez de Guzmán y María Bolívar. Foto cortesía de la familia Guzmán, 2019.



Foto 17: Foto reciente del profesor Mederos. Cortesía de la familia Mederos

RECONOCIMIENTOS Y DESPEDIDA

La Sociedad Venezolana de Geólogos con profundo pesar despide al Geólogo Alfredo Mederos, un profesional excepcional, mentor y colega que dejó una huella imborrable en la geología y en todos quienes tuvimos el honor de conocerlo. Su dedicación, sabiduría y pasión por su trabajo inspiraron a generaciones. Más allá de su brillante carrera, recordaremos su calidez humana, su generosidad y su eterna disposición a guiar a otros. Hoy la comunidad geológica y todos quienes lo apreciamos perdemos a un gran ser humano, pero su legado perdurará en cada roca estudiada, en cada proyecto impulsado y en los corazones de quienes lo admiramos. Descansa en paz, maestro. *"La Tierra guarda su esencia, pero su luz seguirá guiándonos desde el recuerdo."* Foto 18.



Foto 18: Nota de condolencia de la Sociedad Venezolana de Geólogos.



Foto 19: Nota de condolencia de la Facultad de Ingeniería de la ilustre Universidad Central de Venezuela.



Foto 20: Nota de condolencia de la Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos.

Con este artículo biográfico, las autoras rinden homenaje a un ser humano excepcional, cuyo legado permanecerá vivo en quienes tuvimos el privilegio de conocerlo. La vida nos regaló su presencia: un ser extraordinario en todos los sentidos. Extendemos nuestras más sinceras condolencias a su esposa, hijas, nietos, bisnietos, sobrinos, familiares, amigos y a toda la comunidad de las Ciencias de la Tierra en Venezuela.

EPILOGO. El Jardín Mesozoico del Profesor Mederos

Este epílogo es más que un cierre: es un acto de gratitud y memoria. El Jardín Mesozoico germina como un cuento de despedida, sembrado en la nostalgia y florecido en ese instante en que memoria y adiós se entrelazan. Es un paseo por la vida donde el profesor, con un pie en el porvenir, abre las puertas del tiempo y guía a sus alumnas y alumnos para mostrarles que el presente sólo cobra sentido cuando se conocen las raíces antiguas; y que sólo desde esa comprensión es posible abrazar mejor el presente y construir un futuro más pleno. En estas páginas, la memoria se vuelve paisaje, y cada clase compartida se transforma en un sendero hacia épocas remotas, donde la voz del maestro sigue resonando como un eco que no sabe, ni sabrá extinguirse.

Esta es, quizás, la última lección: aquella en la que memoria y despedida florecen en el mismo instante.

El Jardín Mesozoico del Profesor Mederos

Donde termina el mapa de las Eras, comienza el sendero del alma: homenaje a un maestro que nunca dejó de evolucionar.

Por: Luiraima Salazar-Langer



Cuentan los antiguos helechos que un día luminoso de verano, en algún rincón de la Tierra más allá del tiempo, se abrió un claro entre las nieblas del Triásico. No era un cataclismo ni una extinción masiva, sino una fiesta de bienvenida: el cielo de los dinosaurios se preparaba para recibir a uno de sus más nobles amigos.

Por aquel sendero, flanqueado de cycadophytas, ginkgoales y coníferas eternas, caminaba sereno y muy feliz el Profesor Alfredo Mederos, con su cuaderno bajo el brazo y una mirada curiosa que no había envejecido ni un segundo. A cada paso, brotaban recuerdos de aulas llenas de mapas y fósiles, pizarras cubiertas de tiempo y preguntas, y voces jóvenes despertando al asombro.

Un Triceratops juvenil trotó a su lado como un perrito fiel. Desde las alturas, un Pteranodon lo saludó con un chillido de alegría. Y un Estegosaurio lento y amable lo escoltaba por los bordes del sendero florido.

—¡Miren! —decía el profesor, señalando al cielo—, aquel tiene cola, por eso sabemos que aún no hemos cruzado del Jurásico al Cretácico. Es la cola lo que marca la diferencia... ¡Eso y la paciencia del registro fósil! — se reía.

Los dinosaurios lo escuchaban con atención reverente, como si supieran que aquel hombre venía del futuro solo para hacerles justicia, para narrarlos con amor a los niños del siglo XXI.

El bosque Mesozoico vibraba con vida antigua. Las gimnospermas extendían sus copas como sombrillas de bienvenida, y las cycadophytas abrían sus hojas al sol, que en ese lugar era más dorado que en ningún otro.

—¿Y Dios, profesor? —preguntó aquella jovencita “amargada” y “atea” que lo acompañó en el viaje desde el futuro, con la timidez de quien aún no entiende del todo la evolución.

El Profesor Mederos sonrió con esa mezcla de sapiencia y ternura que lo caracterizaba:

—“Dios está en el orden que aún no comprendemos. En el equilibrio de las Eras, en la memoria de las rocas, en el ADN de una pluma que anuncia el vuelo, en el viento que ordena sedimentos ... incluso si tardamos millones de años en entenderlo. La evolución no lo niega, solo lo revela de múltiples formas”

Y así siguió caminando, guiando a sus nuevos alumnos entre Eras y misterios. No había muerte allí, solo continuidad y evolución. No había despedida, solo transición.

Porque para quienes enseñan con el alma, el tiempo no es una línea: es un ciclo fértil, como los anillos de un árbol fósil que aún susurra lecciones al cielo.

Y así, entre palmas primigenias, helechos arborescentes y el murmullo milenario de las gimnospermas, siguieron caminando juntos: el profesor y su discípula.

Él con su libreta llena de mapas y misterios, ella con el alma fresca como una roca recién partida, lista para aprender los secretos del tiempo.

Los dinosaurios los escoltaban en silencio, como guardianes de una historia bien contada. El aire olía a tierra fértil y a eternidad. Cada paso era una lección, cada risa, una hipótesis compartida.

No era el fin de una vida, sino la continuación de una travesía. Porque quienes siembran conocimiento nunca mueren: migran hacia otros planos donde las ideas florecen sin prisa, y donde los dinosaurios —esos que muchos creyeron extinguidos— aún esperan ser comprendidos.

Y cuentan los vientos del Jurásico que, si alguna vez pasas por un claro de helechos y escuchas una voz paciente explicando la diferencia entre colas largas y cortas, entre el vuelo de los Pterosaurios y el salto de la fe, quizás estés cruzando, sin darte cuenta, el umbral del cielo de los geólogos.

Y allí, con suerte, verás al Profesor Mederos... aún caminando, aun enseñando, aun sonriendo.

A mi profe con amor geológico

Luiraima Salazar-Langer

Berlín, 4 de Agosto 2025



Marianto Castro es graduada en la Universidad Central de Venezuela en el año 1980; Master en Geología Sedimentaria en la misma universidad en 1983; Especialización en nannoplancton calcáreo en el programa Lagoven – Total CFP Burdeos, Francia - Centro Nacional de Investigación Científica, Orleans, Francia en 1989; Especialización en Proyectos de Gerencia de Ingeniería en el año 1997 en la Universidad Católica Andrés Bello.

Veintidós años de experiencia en la industria petrolera venezolana trabajando para Lagoven S.A. en el laboratorio de geología; Intevp S.A. como estratígrafo y encargada del Código Geológico de Venezuela; y Petróleos de Venezuela S. A. formando parte del equipo de trabajo de la Gerencia del Conocimiento.

Profesora en la Facultad de Ciencias, Escuela de Geoquímica de la Universidad Central de Venezuela

Diecinueve años de experiencia en Canadá en empresas mineras de exploración y en el sector financiero trabajando para Crystallex International Corporation, geólogo asistente del vicepresidente de exploración; U308Corp, gerente técnico de la base de datos y encargada de control de calidad de las muestras y Marrelli Support Services Inc., como oficial para el cumplimiento de pago o devolución de impuestos; revisión de documentación por parte del Gobierno de Canadá y revisión de reportes financieros a ser presentados por pequeñas empresas mineras (exploración) ante las autoridades competentes en Canadá.

Actualmente, consultor independiente; representante por Venezuela ante la Comisión Norteamericana de Estratigrafía y miembro de la Sociedad de Historia de las Geociencias en Venezuela.

notasgeologiavenezuela@gmail.com



Luiraima Salazar-Langer es ingeniera geóloga (Universidad Central de Venezuela) especializada en geología estructural, interpretación sísmica y geomorfología. Ha investigado en la Universidad de Jena, Alemania, y colaborado en proyectos internacionales. Reside en Berlín, donde combina investigación y divulgación científica con la asesoría a comunidades en riesgo geológico. Autora de Mirada de Mujer.



Massive Nearby Spiral Galaxy NGC 2841. January 24, 2021. Image Credit: NASA, ESA, Hubble, Subaru; Composition & Copyright: Roberto Colombari

Explanation: It is one of the more massive galaxies known. A mere 46 million light-years distant, spiral galaxy NGC 2841 can be found in the northern constellation of Ursa Major. This sharp view of the gorgeous island universe shows off a striking yellow nucleus and galactic disk. Dust lanes, small, pink star-forming regions, and young blue star clusters are embedded in the patchy, tightly wound spiral arms. In contrast, many other spirals exhibit grand, sweeping arms with large star-forming regions. NGC 2841 has a diameter of over 150,000 light-years, even larger than our own Milky Way. The featured composite image merges exposures from the orbiting 2.4-meter Hubble Space Telescope and the ground-based 8.2-meter Subaru Telescope. X-ray images suggest that resulting winds and stellar explosions create plumes of hot gas extending into a halo around NGC 2841.

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