

**ABRIL
SUPLEMENTO
2024**



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 deseas participar o contribuir con algún manuscrito, por favor comunícate 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: El volcán Rano Kau es uno de los tres volcanes principales que conforman la isla de Rapa Nui (Isla de Pascua, Chile). Se trata de un edificio volcánico conformado por rocas basálticas y una caldera que supera el kilómetro y medio. En sus laderas yacen los restos arqueológicos de Orongo, un importante centro ceremonial del pueblo rapanui. Fotografía de **Jorge Enrique Ruiz Uruña** Estudiante de Doctorado del Instituto de Geología de la UNAM.

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

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

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

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

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

Revista de difusión y
divulgación geocientífica.

EDITORES



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

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

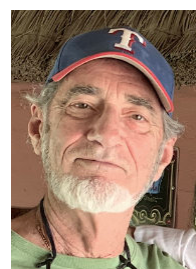
luis.valencia.11@outlook.com



Bernardo García-Amador es candidato a doctor en Ciencias de la Tierra por la UNAM. Su pasión es entender las causas y consecuencias de la tectónica. Actualmente se encuentra en proceso de graduarse del doctorado, con un trabajo que versa en la evolución tectónica de Nicaragua (Centroamérica). Además imparte el

curso de tectónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Recientemente Bernardo ha publicado parte de su trabajo de doctorado en las revistas Tectonics y Tectonophysics, además de ser coautor de otros artículos científicos de distintos proyectos.

bernardo.garcia@ingenieria.unam.edu



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

2002 on exploration projects in Mexico. He has been a member of HGS since 1980 and AAPG since 1981, and currently does geology from his home in Granbury, Texas.

jhrosenfeld@gmail.com



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

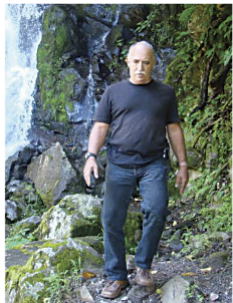
COLABORADORES



Salvador Ortuño Arzate received his M. Sc. from the National Autonomous University of Mexico (UNAM) and his Ph.D. from the Université de Pau and Pays de l'Adour (UPPA) in France. He has been a researcher at the Instituto Mexicano del Petróleo and the Institut Français du Pétrole, focusing his work on the Exploration Petroleum field. Salvador has published several papers and a book, "El Mundo del Petróleo" (Petroleum's world),

examining and shedding light on the history of petroleum and the implications for the society. Also, he has worked as an advisor for several universities and national corporations. Lastly, he has served as faculty and has taught different courses at the Secretariat of National Defense and at the Engineering School of U.N.A.M.

soaortuno@gmail.com



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 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



Marisol Polet Pinzon Sotelo. Ingeniera Geóloga egresada de la Universidad Autónoma de Guerrero y Maestra en Ciencias Geológicas por la Universidad Autónoma de Nuevo León; ha colaborado en proyectos de investigación en el noroeste de México; cuenta con 9 años de experiencia en exploración de hidrocarburos en PEMEX Exploración y Producción. Se ha desarrollado

en el modelado de sistemas petroleros y estudios de Plays en Proyectos de aguas ultra profundas, profundas y someras en el norte del Golfo de México. Actualmente pertenece al Activo de Exploración Marina Norte de la Subdirección de Exploración.

poletpinzon@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

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.

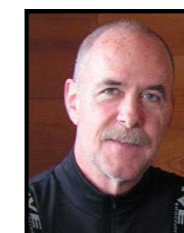
rodriguez.artega@gmail.com



María Guadalupe Cordero Palacios es candidata para obtener el grado de maestra en ingeniería por la UNAM, geocientífica entusiasta por la divulgación en México. Se ha desempeñado como geocientífica en el área de exploración de recursos naturales en las empresas Fresnillo PLC, SGM y ha colaborado

con la Universidad Complutense de Madrid. Su principal gusto en las geociencias se centra en la geología estructural.

lup@comunidad.unam.mx



Jon Blickwede egresó de la Universidad de Tufts en Boston, Massachusetts, EEUU con un Bachillerato en Ciencias de la Tierra en 1977. Entró a la Universidad de New Orleans, Louisiana en 1979, donde hizo su tesis de Maestría en Geología sobre la Formación Nazas en la Sierra de San Julián, Zacatecas, México. Jon comenzó su carrera en 1981, trabajando por 35 años como geólogo de exploración petrolera para varias compañías tal como Amoco, Unocal, y Statoil. Realizó

proyectos de geología sobre EEUU, México, Centroamerica y el Caribe para estas empresas. Durante 2018, Jon fundó la empresa Teyra GeoConsulting LLC (www.teyrageo.com), donde está realizando un proyecto de crear afloramientos digitales y excursiones geológicas virtuales en EEUU y México, utilizando imágenes tomados con su drone, integrados con otros datos geoespaciales.

jonblickwede@gmail.com



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

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

ensilvacruz@gmail.com



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, logeo geológico, instrumentación geotécnica, cartografía de riesgos, supervisión de perforaciones y difusión de geopatrimonio.

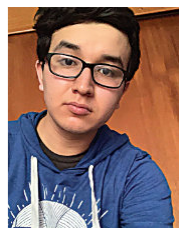
gleon.laura@gmail.com



Saúl Humberto Ricardez Medina es pasante de Ingeniería Geológica, miembro activo del capítulo estudiantil de la AAPG del Instituto Politécnico Nacional, participó en el X Congreso Nacional de Estudiantes de Ciencias de la Tierra como Expositor del trabajo "Análisis de Backstripping de la Cuenca Salina

del Istmo". Actualmente, se encuentra trabajando en su tesis de licenciatura relacionada a identificar y reconocer secuencias sedimentarias potencialmente almacenadoras de hidrocarburos en las cuencas del sureste.

ricardezmedinasaulhumberto@gmail.com



Miguel Vazquez Diego Gabriel, es estudiante de la carrera de Ingeniería Geológica en la Universidad Nacional Autónoma de México (Facultad de Ingeniería), 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

EDICIÓN ESPECIAL XV



TABLA DE CONTENIDOS

RESPUESTA IMPULSIONAL DE TRITIO Y RADÓN 222 POR EL EFECTO DE LAS LLUVIAS INTENSAS EN UN KARST LITORAL. 1. ANÁLISIS CUALITATIVO

L.F. Molerio León y Carlos M. González Ramírez

FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL KARST CUBANO

L.F. Molerio León y Ana Margarita Sardiñas Gómez

Universidad Autónoma de Baja California Sur.

Departamento Académico de Ciencias de la Tierra.

RESPUESTA IMPULSIONAL DE TRITIO Y RADÓN 222 POR EL EFECTO DE LAS LLUVIAS INTENSAS EN UN KARST LITORAL. 1. ANÁLISIS CUALITATIVO

L.F. Molerio León

INVERSIONES GAMMA, S.A.

Apartado 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba,

E-mail: especialistaprincipal@gmail.com

Carlos M. González Ramírez

Centro de Pronósticos del Tiempo, Instituto de Meteorología

Apartado 17032, CP 11700

Loma de Casablanca, Regla, La Habana, Cuba

E-mail: carlosmsgonzalez88213@gmail.com

RESUMEN

La recarga de lluvias intensas asociadas a los ciclones tropicales y procesos típicos de la región tropical durante el año 2005, provocó la mezcla de aguas subterráneas de diferente tiempo medio de residencia en un sistema de flujo regional cársico litoral del Occidente de Cuba. El efecto fue identificado mediante evidencias isotópicas derivadas de la medición mensual de la actividad de Tritio y Radón 222 en las aguas subterráneas, conjugadas con otras variables físicas y químicas en el periodo 2005-2006 además de los registros de lluvia en las estaciones meteorológicas Casablanca, la ubicada en Boca de Jaruco, cerca del área de estudio y la OIEA-GNIPCU01 a unos 50 km al sur-suroeste del área de estudio. Los resultados permitieron distinguir diferentes tipos de mezcla de aguas asociadas al grado de atenuación de las señales de recarga en el acuífero, promovido por la existencia de fuentes diversas de recarga, un origen diferenciado de las aguas subterráneas y la integración estacional y episódica de diferentes niveles de cavernamiento o sistemas locales de flujo. Pudo distinguirse un amplio espectro entre aguas con cero ³H hasta de valores del orden de las 70 UT, pasando por aquellas del mismo orden de la precipitación actual. El acuífero cársico está afectado por intrusión marina y sometido a explotación petrolera de manera que las técnicas isotópicas contribuyeron a distinguir el origen de la contaminación de las aguas subterráneas por diferentes tipos de Líquidos de Fase No Acuosa y la eventual presencia de sustancias radioactivas naturales (NORM) o incluso NORM asociados al proceso técnico.

Palabras clave: acuífero cársico, intrusión marina, petróleo, tritio, radón, huracanes, Cuba

ABSTRACT

The recharge of hurricane rains associated during the year 2005 caused different types of mixing of ground waters in a regional karst coastal flow system of Western Cuba. The effect was derived from isotopic evidences of the monthly monitoring of Tritium and Radon 222 activity in ground waters, conjugated with other physical and chemical variables as well as the input rainfall recorded at the Casablanca, Boca de Jaruco and OIEA-GNIPCU01 stations. Results showed different types of groundwater mixing associated to the grade of attenuation of the recharge signals in the aquifer, the existence of diverse recharge sources, a differentiated origin of the underground waters and the seasonal and episodic integration of different cave levels or local flow systems. A wide mean residence time spectra was distinguished among waters with zero ³H until of values of 70 TU, including those of the same order of the current precipitation. The karst aquifer is affected by sea water intrusion and subjected to oil exploitation so that the isotopic techniques contributed to distinguish the origin of the contamination of the underground waters by different types of Non-Aqueous Phase Liquids (NAPLs) and the eventual presence of Normally Occurring Radioactive Materials (NORM) or even Technical Enhanced NORMs.

Key words: karst aquifer, seawater intrusion, oil, tritium, radon, hurricanes, Cuba

INTRODUCCIÓN

Durante el año 2005 se produjeron importantes procesos atmosféricos que generaron gran inestabilidad en la región del archipiélago cubano y sus mares adyacentes debidos a lluvias intensas. Las condiciones de fase neutral del Niño Oscilación del Sur (ENOS), las altas temperaturas en las aguas del Atlántico Norte y los vientos débiles a alturas de 10-12 kilómetros, estuvieron incidiendo directamente en la formación de ciclones tropicales durante ese año. En este sentido la temporada ciclónica en el Atlántico Norte durante el 2005 fue hiperactiva con 31 ciclones tropicales o subtropicales (Fig. 1), fue la segunda más activa que se haya registrado, solo superada por la de 2020 (Farris, 2005). De ellas, 15 alcanzaron la Categoría Saffir-Simpson SS-3 o superior (Cobas et al., 2010). Cuatro llegaron a la máxima categoría SS-5 (Emily, Katrina, Rita y Wilma).

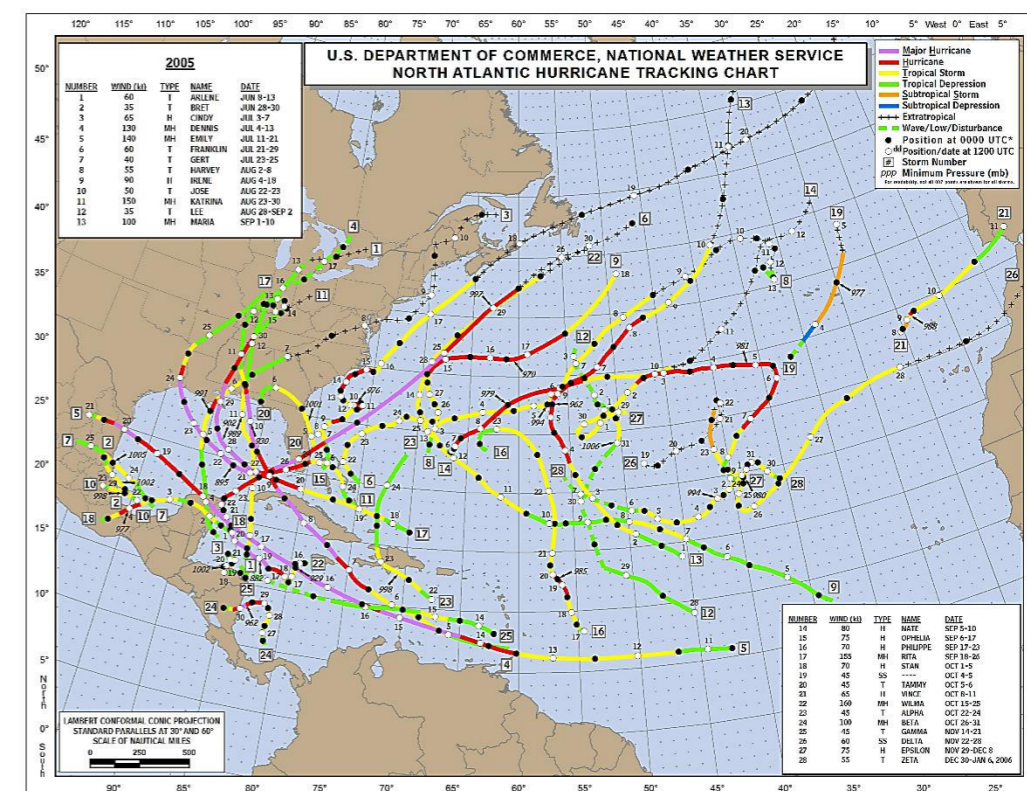


Fig. 1. Trayectoria de los ciclones tropicales formados en el 2005.

Las fuertes marejadas, los vientos fuertes y las intensas lluvias, causaron numerosos estragos y, particularmente en Cuba, los efectos socioeconómicos fueron especialmente notables. Sin embargo, destacan por su importancia hidrológica la afectación directa e indirecta de los ciclones tropicales nombrados Arlene, Bret, Dennis, Katrina, Rita y Wilma. La Tormenta Tropical Arlene (8-13 de junio), la primera de la temporada (Hernández y Bravo, 2005), fue un sistema débil, pero como la región de estudio quedó en el lado derecho de su trayectoria, precipitó 108 mm de lluvia a su paso por Cuba, lo que dejó al descubierto un grupo importante de fenómenos hidrodinámicos en los acuíferos cársicos costeros de la franja Canasí, Puerto Escondido y Yumurí (Figs. 2 y 3) puestos de manifiesto a partir del monitoreo de Radón-222 y Tritio (³H) en las aguas subterráneas. El Huracán Dennis (7-9 de julio) de categoría SS-4 (Ramos, 2009), atravesó Cuba occidental de Sur a Norte y salió al mar cerca de Bacuranao a unos pocos kilómetros del área de estudio (Fig. 4). Las láminas de lluvia asociadas a estos dos ciclones tropicales en combinación con procesos complejos de la zona tropical, alcanzaron en la cercana estación de Boca de Jaruco, los 503,3 y 301,9 mm en junio y julio, respectivamente. La estación de referencia nacional, Casablanca, registró 563 y 158,6 mm. La correlación lineal de la lámina de lluvia histórica entre ambas estaciones es del 88% (95% de certidumbre)



Fig. 2. Área estudiada (enmarcada en amarillo)

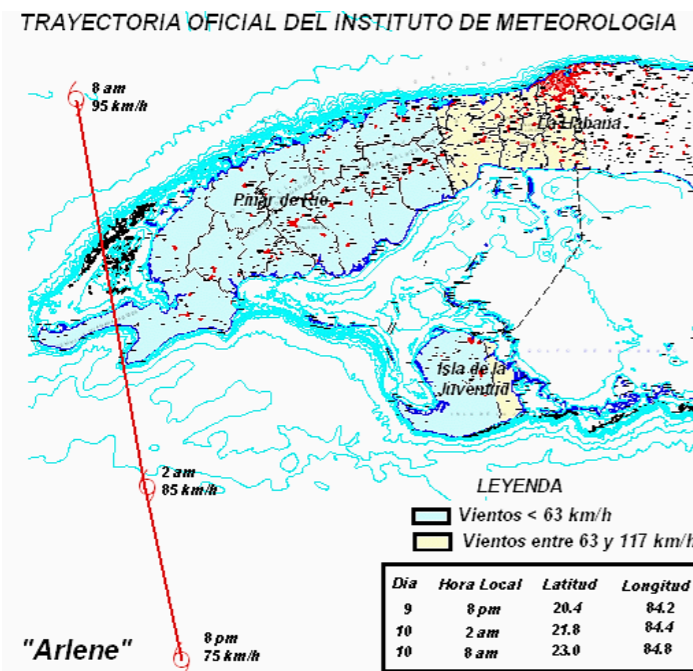


Fig. 3. Trayectoria Oficial del Instituto de Meteorología de Cuba para la Tormenta Tropical Arlene (Ballester et al.,2005)

Complejos patrones de organización de flujo y su respuesta impulsional a eventos de lluvias intensas huracanadas en sitios sin prácticamente escurrimiento superficial -por la naturaleza abierta del karst local- indican mezclas aguas de reciente infiltración con flujos de largo tiempo de residencia en el acuífero. Picos de hasta 70 UT así como valores de cero ^3H revelan un amplísimo espectro de circulación de las aguas en sistemas de flujo de muy reducida expresión en superficie y en profundidad, desde aguas con tránsito superiores a los 100 años, tritio cosmogénico asociado a los patrones de las explosiones termonucleares de la década de 1950 y valores muy bajos en correspondencia con la rápida infiltración de lluvias actuales con ^3H ya muy deprimido (Terzer-Wassmuth et al., 2022)

La fuerte actividad de Radón en las aguas subterráneas indica la existencia de fuentes radioactivas. Las actividades de Radón que sobrepasaron en determinados momentos hasta en cuatro (4) veces la común en las aguas subterráneas son indicadores de fuentes radioactivas, aparentemente de Materiales Radioactivos Naturales (NORM) pero, al tratarse en los tres casos de yacimientos gasopetrolíferos, no se descuenta que se incorporen NORM asociados a los que se incrementan tecnológicamente (TE-NORM). Esto no ha sido estudiado aún.

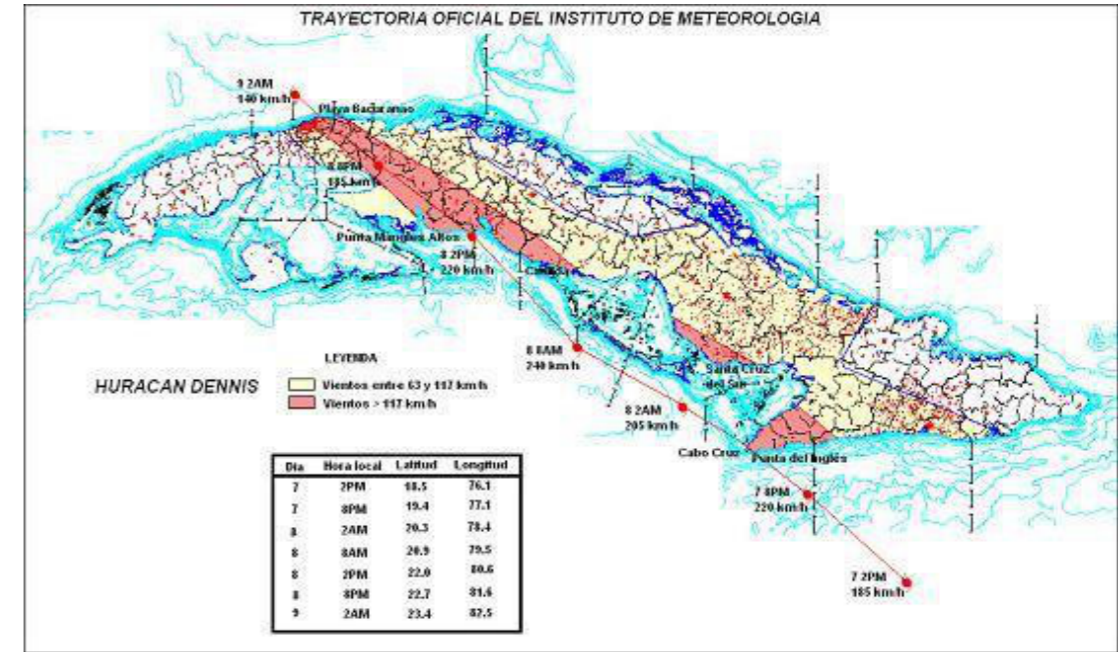


Fig. 4. Trayectoria Oficial del Instituto de Meteorología para el Huracán Dennis, (Ballester et al.,2005)

USGS (1999) señala que las aguas subterráneas que coexisten con los depósitos de hidrocarburos presentan concentraciones inusualmente altas adquiridas durante un largo tiempo de contacto agua-roca. Las aguas de muchos campos gasopetrolíferos son particularmente ricas en Cloruros, lo que incrementa la solubilidad de otros elementos entre los que se incluye el Radio, que es un elemento radioactivo. Estas aguas altamente salinizadas son extraídas durante la producción de petróleo y tiene que ser dispuestas por algún método, sea en piscinas a cielo abierto, devueltas al yacimiento o mediante inyección somera. Se ha reportado, asimismo, que muchos ductos y tanques por los que circula esta agua producida pueden estar interiormente recubiertas por una capa de escamas que contienen Radio. El karst local, las cuevas (Cigna, 2005; Carrazana et al., 2010; Espinosa, 2016) y la presencia de hidrocarburos en las aguas subterráneas someras pueden enmascarar los valores de la actividad del Radón y constituir una fuente de incertidumbre de su actividad y distribución espacial (Molerio, 2009).

La combinación de ^{222}Rn y ^3H resulta especialmente útiles para definir procesos de intrusión marina y salinización de acuíferos, los mecanismos de dispersión y el tiempo de tránsito (residencia) de las aguas subterráneas y han sido sostenidamente aplicados con éxito en las características del karst del Trópico Húmedo de Cuba (Molerio, 2006, 2007, 2008, 2012; Molerio, Fernández y Carrazana, 2012a, 2012b).

Este artículo estudia la respuesta impulsional variable al efecto de recarga local y la lámina de lluvia acumulada en interés de conocer la estructura hidrodinámica del sistema acuífero tanto al efecto de recarga localizada de lluvias intensas en un ambiente cársico de alta permeabilidad como a las láminas acumuladas de recarga natural. Estos eventos, de igual modo, contribuyen a la identificación de los tiempos de residencia de las aguas, las mezclas de los horizontes acuíferos involucrados y permiten un acercamiento a la radioactividad natural del territorio. Los estudios se concentraron en el acuífero cársico litoral de la franja Canasí, Puerto Escondido y Yumurí y se centraron en el muestreo integral de las aguas subterráneas en tres pozos de observación del régimen y la calidad de las aguas subterráneas. La revalorización de esta actividad elevada de ^{222}Rn y el comportamiento del ^3H llevó al muestreo y determinación de la actividad radioactiva en testigos de perforación colectados en la zona no saturada y al nivel del acuífero en dos calas de exploración geológica a fines de 2021 en el sector del interfluvio Canasí-Puerto Escondido. Este procesamiento fue realizado en el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) de Cuba.

RÉGIMEN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA E ISOTÓPICA SUMARIA DE LAS AGUAS DE LLUVIA EN CUBA

La torrencialidad de las lluvias es una característica inherente al Trópico Húmedo. Este fenómeno está asociado básicamente a las lluvias convectivas y huracanadas, pero en otros tipos de lluvia, el fenómeno también se manifiesta. Estas lluvias de gran intensidad (elevada lámina en corto intervalo de tiempo) singulariza las curvas de Intensidad-Frecuencia-Duración, fundamentales para el cálculo de avenidas y la proyección de obras hidráulicas, pero adquieren una importancia adicional en tanto contribuyen a activar la circulación de aguas subterráneas de diferente composición química e isotópica y tiempo de tránsito en el acuífero, como se comenta en este artículo.

Molerio (1992, 2012) ha sintetizado las características químicas e isotópicas de las aguas de lluvia de Cuba del modo siguiente:

- Respecto al tipo y distribución de la lluvia en Cuba, debe destacarse que la amplitud más variable de la temperatura media diaria en el interior de la isla de Cuba, donde se registran rasgos de continentalidad, es del orden de los 11-14°C; en las zonas costeras, de 8-10°C y en las montañas, con temperatura media de 16°C a 1500 m, el gradiente de temperatura es de 0,55°C/100 m.
- La media normalizada para la serie de 42 años de la lluvia del país es de 1375 mm, distinguiéndose dos estaciones, la lluviosa, de mayo a octubre, en que -como promedio- se precipitan 1059 mm y la menos lluviosa, en que se registran unos 316 mm, y se extiende de noviembre a abril. La distribución de la lluvia en el país es bastante irregular. Ello se debe a: 1/ la diferente influencia de los procesos atmosféricos condicionados por el sistema general de circulación del aire; 2/ el relieve del país, que presenta grandes contrastes topográficos e influye sobre la formación e intensidad de las precipitaciones y 3/ el calentamiento irregular de la superficie de la tierra firme y de las aguas costeras.
- Planos (2022) ha actualizado estas series y señala que el valor promedio de precipitación a escala de país, en el período 1901-2020 es 1314 mm, con un CV de 0,10. La variabilidad de este elemento en los últimos 120 años, visualmente demuestra que, de 1901 al 1960, la tendencia es acentuadamente creciente, con un promedio de 1323 mm y un CV de 0,08; y desde el 1960 hasta el 2020, el sentido predominante es decreciente y el promedio 1307 mm, con un CV de 0,12. En el período comprendido entre 1960 al 2020 se distinguen dos sub-períodos, con las características siguientes: (a) 1960 al 1990 con tendencia claramente negativa, y promedio de 1292 mm y CV de 0,13 y (b) 1991 al 2020, donde no se observa una tendencia claramente definida, y promedio de 1322 mm y un CV de 0,11.
- En el invierno -período poco lluvioso-, sobre las regiones Occidental y Central de Cuba se extienden, con frecuencia, las altas presiones migratorias, con una masa de aire más seca y estable que vienen detrás de los frentes fríos. Durante el verano – periodo lluvioso- se fortalece la influencia de las altas presiones subtropicales; lo que favorece la influencia de los sistemas meteorológicos propios de la zona tropical, como las bajas presiones tropicales, vaguadas, ondas tropicales y los ciclones tropicales, los que a su vez causan intensos aguaceros y tormentas eléctricas debido a las incursiones de aire húmedo. A principios del periodo lluvioso se generan importantes interacciones entre los trópicos y extra trópicos, produciéndose gran inestabilidad atmosférica, la manifestación más visible de esta interacción es el establecimiento de la vaguada estacional mayo-junio, siendo este sistema un gran modulador de las precipitaciones que se registran en estos dos meses, e incluso en algunos años puede ser un catalizador para la formación de depresiones tropicales y tormentas tropicales débiles.
- Otra componente importante que explica la irregularidad de las precipitaciones, viene dada por los huracanes y ciclones tropicales. En las zonas montañosas y de alturas menores, las precipitaciones se redistribuyen de manera que los gradientes pluviométricos coinciden con los valores absolutos que se registran en las vertientes de barlovento. En las costas, bahías y valles fluviales las precipitaciones disminuyen.
- De este modo se reconocen cuatro tipos fundamentales de lluvia en el territorio cubano: convectivas, frontales, orográficas y huracanadas.

- La intensidad máxima de los aguaceros está en relación inversa con su duración. Excluyendo las lluvias huracanadas, la intensidad máxima de las lluvias torrenciales es de 5 mm/1 min; aguaceros con intensidades de 3-4 mm/min tienen una duración de 5-10 min; de 2,4-3 mm/min, 20 minutos y, entre 1,32 y 1,85 mm/min, una hora. El número de días con lluvia (> 1 mm) aumenta de la costa hacia el interior, incluyendo las zonas montañosas y llega a alcanzar 160 días en el año
- En cuanto concierne a la relación entre la concentración de ¹⁸O y la distancia a la costa Norte, las precipitaciones se enriquecen en ¹⁸O según se avanza hacia el interior del país. Si este comportamiento es una regularidad, sugiere que, en determinados momentos, puede encontrarse una influencia de lluvias originadas en otra fuente de evaporación diferente del Mar Caribe, posiblemente asociado con lluvias frontales en invierno y al control del Anticiclón de las Bermudas (Fig. 5).
- Los valores ponderados de ¹⁸O en verano para todas las estaciones del país muestran, con un alto coeficiente de correlación (-0,85), la fuerte dependencia entre la concentración del isótopo de referencia y la distancia a la costa Sur. El signo indica el decrecimiento de la concentración tierra adentro, con una pendiente de -0,128 ‰/km. La concentración media esperada, en la línea de la costa, de acuerdo con el intercepto calculado, es positiva, del orden del 1 ‰. ¹⁸O, indicativa de la fuerte influencia de los aerosoles marinos. Del mismo modo, parece quedar claro que la fuente de calor y humedad de las lluvias se debe encontrar en el Sur, proveniente del mar Caribe. En verano, por otro lado, no existe ninguna correlación significativa con la distancia a la costa Norte, lo que indica la independencia entre la composición isotópica (en ¹⁸O) y cualquier fuente de calor y humedad situada al Norte de Cuba o como resultados de los procesos convectivos que ocurren por el calentamiento diurno y que resultan en la presencia de la Línea de Confluencia del Flujo a Mesoescala (LCFM).
- Sin embargo, en invierno, el cuadro es diferente. La mejor correlación (+0,6) fue encontrada con la distancia a la costa Norte de las estaciones. El signo positivo indica un proceso inverso en el cual se debe esperar un enriquecimiento invernal motivado por el predominio de lluvias frontales asociadas al avance de masas de aire frío desde el continente, al Norte. Por añadidura, no dejó de encontrarse una cierta correlación con la distancia a la costa Sur, en invierno (-0,45) que indica la presencia de otra fuente de calor y humedad, proveniente desde el mar Caribe, que debe funcionar durante el período comprendido entre cada "frente frío"

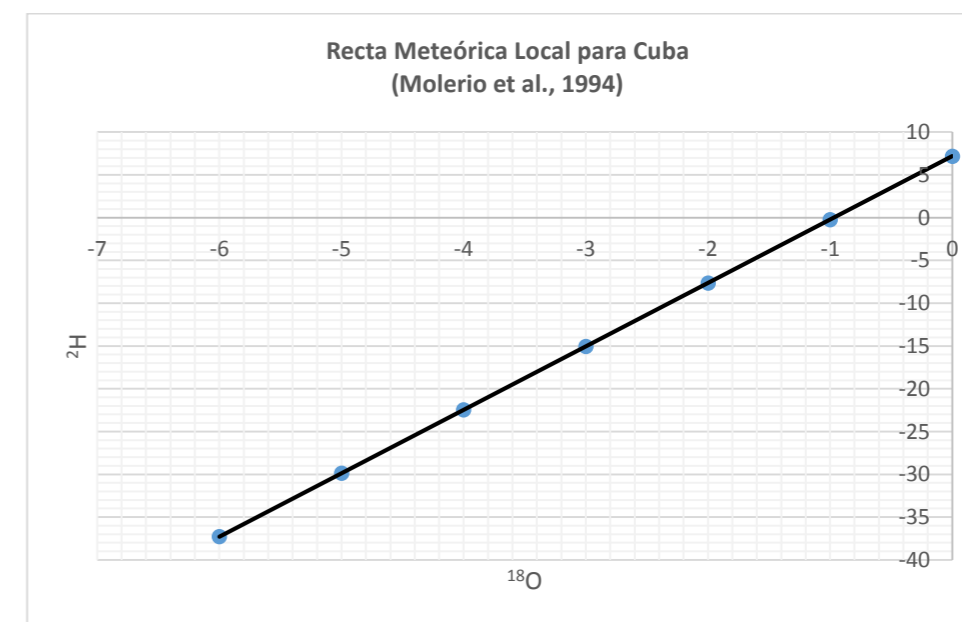


Fig. 5. Recta Meteorológica Local (RML; $\delta^2H = 8,222222 \delta^{18O} + 2,22$ (Molerio et al. 1994, 2020a)

ENTORNO GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO LOCAL

Para los fines de este artículo solamente interesa la estructura de los sedimentos de la Cobertura Neotectónica eventualmente afectada por neotectónica que afloran en el litoral e incluyen los depósitos carbonatados y carbonatado-terrestres de las formaciones carbonatadas carsificadas diferenciadamente Jaimanitas, Cojímar y Güines que afloran en el área. Fm Vedado no se ha reconocido fuera de toda duda en la zona. Fm Güines yace concordantemente sobre Fm Cojímar, mas no sobre Fm Jaimanitas en el área del acuífero estudiado, donde depósitos coluvio-proluviales enmascaran el contacto transgresivo.

El **Acuífero Canasí**, en este sector (Fig. 6), se expresa morfológicamente como una terraza marina emergida extendida de este a oeste y de no más de 500 metros de ancho en su parte más amplia, limitada al sur por un escarpe elevado. Las rocas preneogénicas no afloran en el sitio. El relieve, en general, se expresa morfológicamente en un sistema de terrazas marinas emergidas. La primera terraza marina, en la línea costera, a su nivel, pero ligeramente elevada por neotectónica, son calizas arrecifales que descansan sobre margas de Fm Cojímar que fueron reconocidas en profundidad en una de las perforaciones de exploración a partir de los 8 m. Es una caliza biohémica, con restos de moluscos y corales y su espesor en tierra llega a ser de unos pocos centímetros. La destrucción del antiguo arrecife por erosión da lugar al desarrollo de parches de arena de grano medio a grueso formada por restos de corales y moluscos. Las rocas carbonatadas de esta secuencia se expresan en un escarpe marino abandonado, carsificado a diferentes niveles por procesos hipogénicos de mezcla de aguas vinculados con posiciones pretéritas del nivel del mar y solevantamiento neotectónico.

El territorio experimenta una neotectónica activa que, localmente, se expresa en movimientos dominantes ascendentes expuestos en el cliff marino abandonado al sur, donde mejor se expresan (Fig. 7). Ciertos ciclos de estabilidad se reconocen en ese escarpe y se expresan en un cavernamiento de margen costero, pero de poco desarrollo en profundidad. Los movimientos ascensionales, en general, han sido rápidos en la etapa de la Transgresión Vedado (Plioceno-Pleistoceno Inferior).



Fig. 6. Superficie de la terraza marina emergida que contiene al acuífero estudiado. A la derecha de la foto, parte del escarpe elevado que constituye su límite meridional (Foto del autor)

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



Fig. 7. Escarpe meridional que forma el límite sur del acuífero y constituye su zona principal de alimentación natural (Foto del autor)

RADÓN

Espinosa (2016) ha preparado un resumen de las características del Radón que seguimos aquí.

El radón es un gas noble, radioactivo, producto natural de la cadena del decaimiento del ^{238}U , ^{235}U y del ^{232}Th , elementos que existen distribuidos en nuestro planeta Tierra, desde su origen. En el medio ambiente se encuentran presentes tres isótopos del radón; el radón-222 (^{222}Rn), producto de la cadena de decaimiento del uranio (^{238}U) con una vida media de 3,8 días; el radón-220 (^{220}Rn) también llamado torón, producto de la cadena natural del ^{232}Th , con una vida media de 3,96 segundos y el radón-219 (^{219}Rn) también conocido como actinon, que se genera del decaimiento de ^{235}U y tiene una vida media de 55 segundos. En las Fig. 8-10 se muestra la cadena natural de decaimiento del ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th .

Siguiendo esta cadena, como ejemplo, el isótopo del uranio (^{238}U) éste decae a torio (^{234}Th) por emisión de partículas alfa, y este a su vez decae en protactinio (^{234}Pa), y esta cadena continúa hasta el radio (^{226}Ra), teniéndose la característica de que todos estos elementos son sólidos y permanecen dentro de la molécula que lo contiene como sólido. Pero al pasar del radio (^{226}Ra) al radón (^{222}Rn) por la emisión de una partícula alfa, los átomos cambian de estado de sólido a gaseoso, generando así una emanación al medioambiente, permaneciendo en el aire que respiramos hasta su siguiente transformación en la cadena, en 3,8 días, convirtiéndose en polonio (^{218}Po) sólido, con vida media de 3,1 minutos, posteriormente decae por emisión beta en plomo (^{218}Pb) con vida media de 26,8 minutos. Este a su vez decae emitiendo otra partícula alfa en bismuto (^{214}Bi) con vida media de 19,7 minutos, emitiendo otra partícula alfa en plomo (^{210}Pb), para finalmente, pasando por bismuto (^{210}Bi), polonio (^{210}Po) y talio (^{206}Tl), terminar en plomo (^{206}Pb), elemento estable. Esto mismo ocurre con las otras dos cadenas del decaimiento del ^{235}U y del ^{232}Th , que se muestran en las Figs. 9 y 10, que generan el torón (^{220}Rn) y el actinon (^{219}Rn).

La elevada movilidad del Radón, debida a su estado gaseoso y tratarse de un gas noble migra a la superficie y al medio geológico por la vía de las discontinuidades del suelo y rocas (poros, grietas, cavernas, fallas) Este fenómeno de exhalación provoca que el Radón esté presente en toda la superficie del planeta y sea parte de la atmósfera terrestre, en la que se distribuye por razón de los vientos y corrientes convectivas. Pero una especial característica del Radón es que se acumula en lugares cerrados, tales como las cuevas, habitaciones, edificios y de ahí contribuir a la nocividad del medio. En el intercambio con el medio geológico se encuentra Radón en las aguas terrestres (superficiales y subterráneas) y en las marinas, generalmente en muy bajas concentraciones, pero, relativamente, en las aguas subterráneas puede ser ligeramente mayor.

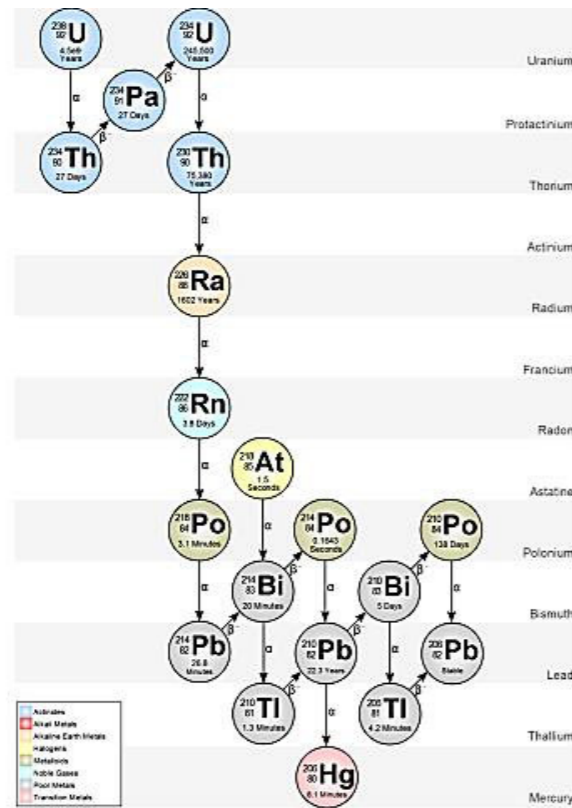


Fig. 8. Cadena natural de decaimiento del uranio (^{238}U), tomada de Espinosa (2016)

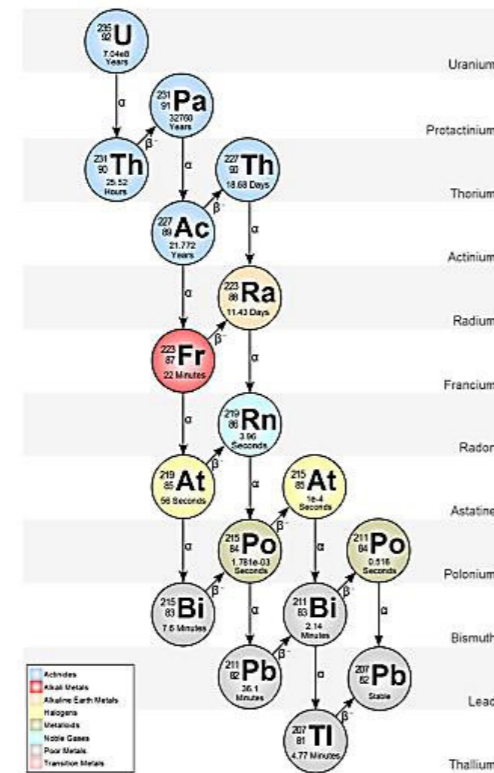


Fig. 9. Cadena de decaimiento natural del uranio (^{235}U), tomada de Espinosa (2016).

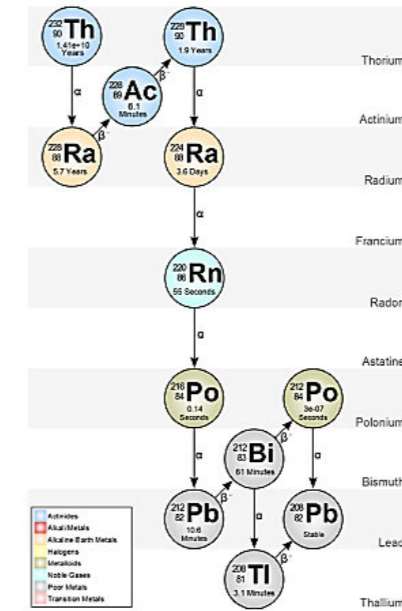


Fig. 10. Cadena de decaimiento natural del torio (^{232}Th), tomada de Espinosa (2016)

En Cuba, por lo general en ambientes cársicos, las aguas subterráneas la actividad del ^{222}Rn no sobrepasan los 3 Bq/L. Reportes de Fernández et al. (2005) para un balneario radónico en Cuba, mostraron actividades de ^{222}Rn entre 2,97 y 3,71 Bq/L, muy inferiores a las registradas en Canasí. Concentraciones elevadas pueden constituir un riesgo radiológico para la salud. El Radón por lo común no constituye peligro alguno para la salud humana excepto cuando: a) la exposición a las fuentes naturales indique que se requieren controles de protección específicos por su prevalencia en el aire o b) si materiales minados o procesados o extraídos durante el minado o producidos en el proceso exhiben actividades muy elevadas. Este es el caso que consideran los NORM (IAEA, 2005).

En los yacimientos gasopetrolíferos, los NORM están asociados al petróleo crudo, agua producida y gas natural (IAEA, 2003). En estos casos, se encuentran NORM en las cortezas internas de los ductos, formadas por la mezcla de aguas no compatibles o por cambios de temperatura, a los residuos lodosos y las arenas de perforación. Esas cortezas (Fig. 11), que se reportan en la literatura como formadas por BaSO_4 , SrSO_4 y CaCO_3 no han sido aún reportadas en el caso de estudio que se comenta en este artículo; no obstante, en las aguas producidas muestreadas son mayoritarios Ba (14,4 mg/L), Ca (58,5 mg/L) y Sr (11,7 mg/L) y entre los metales y microelementos, Mg es dominante (85,1 mg/L) pero con bajos SO_4 (5,2 mg/L) y altos HCO_3 (9070 mg/L) y Cl (\square 30000 mg/L).



Fig. 11. Costra de sedimentos en un ducto de petróleo abandonado

La prospección de estos materiales en un importante repositorio de residuos petrolizados, no mostró concentraciones de consideración de ^{236}Ra y sus hijos. Los productos de decaimiento del Radón emiten aproximadamente la misma radioactividad en operación que en shutdown.

TRITIO

La referencia para el input de Tritio en las precipitaciones es la estación OIEA-GNIPCU01 (CPHR, La Habana, Cuba; <http://nucleus.iaea.org/wiser/index.asp>) para el período marzo 2002 - diciembre 2018, localizada a unos 50 km al sur-suroeste del área e estudio, en la que se observa la franca tendencia a la disminución sostenida del aporte de Tritio en las precipitaciones hacia niveles previos a las explosiones termonucleares en la atmósfera. Las variaciones espaciales (IAEA, 2001) no son de consideración, debido a que el contenido de Tritio no está influenciado por las variaciones de temperatura (como los isótopos estables) y aunque están sometidas a un proceso de fraccionamiento asociado a la evaporación y la condensación, esos efectos pueden despreciarse (véase también a Machta, 1968; McNaughton, 1972; Schmidt, et al, 2020; entre otros). No así la respuesta estacional, incluida la debida a eventos extremos o lluvias intensas donde pueden esperarse importantes fluctuaciones en el contenido de ^3H en un período corto si contribuyen varias masas de aire a la precipitación en un sitio (McNaughton, 1972; IAEA, 2001). Estas, incluso, pueden provocar diferencias en la distribución espacial del Tritio (Van Rooyen, Miller y Palcsu, 2019).

En estudios anteriores a 2002, en Cuba se utilizaron los registros de la Estación Miami y, aprovechando la excelente correlación entre ésta y Hatteras ($R=0,92$ para el 95% de certidumbre) para casos específicos se extendió la serie combinando ambos registros (Fig. 12). Otros estudios específicos en Cuba adoptaron los resultados de mediciones específicas en estaciones especialmente instrumentadas para esos proyectos y cuyos datos se encuentran en la data OIEA/GNIP (Arellano, Molerio y Surí, 1992; Arellano et al., 1993; Arellano, Molerio y Santos, 1993; Molerio, 1993, 1994, 2001, 2004, 2006a, 2006b, 2007a, 2007b, 2020a, 2020b, 2020c; Molerio et al., 1993, 2001, 2002a, 2002b; Molerio y Pajón, 2004; Molerio, Pin y Guerra, 2007; Peralta et al., 2006; Dapeña et al., 2006).

El comportamiento estacional se muestra en la Fig. 13 y la Tabla 1 resume la estadística sumaria de las series para los períodos lluvioso (mayo-octubre) y menos lluvioso (noviembre – abril). Nótese que no hay una diferencia sustancial entre los contenidos de tritio entre ambos períodos, siendo sólo un 9% más alto en el período lluvioso que en estiaje (para la serie homogeneizada, es de un 15% mayor). Considérese también que las series no son muy largas y existen menos observaciones para el estiaje (que coincide con los meses de invierno) que, para el verano, que es cuando ocurre la mayor recarga estacional, aunque este es un concepto que, por la naturaleza cársica de éste y de los acuíferos más importantes de Cuba, no puede adoptarse categóricamente. Homogeneizando las series, los valores son ligeramente diferentes para el período menos lluvioso, no así para el lluvioso que son idénticos. El análisis de la tendencia en la distribución estacional de Tritio muestra (Fig. 14) que el contenido en el período menos lluvioso del año cae con una pendiente mayor que en el período lluvioso.

El Tritio (^3H) es parte de la molécula de agua y, por tanto, es el trazador por excelencia del movimiento del fluido. Indicador del tiempo medio de residencia de las aguas (TRES –Tiempo de RESidencia- o MRT –Mean Residence Time) es un recurso invaluable para definir la presencia de aguas de diferente tiempo de tránsito en el acuífero para separar las componentes de recarga moderna de otras más antiguas y, por ello, del tiempo de contacto agua-roca.

En su definición clásica, las “aguas modernas” (Clark y Fritz, 1997) son aquellas recargadas en las últimas décadas y hacen parte de un ciclo hidrológico activo. Como consecuencia de las pruebas termonucleares en la atmósfera (mayo, 1951 a 1976) la firma de Tritio en las aguas constituye el estándar adecuado para estas “aguas modernas”. El decaimiento radioactivo de ^3H hace que aguas recargadas antes de 1950 apenas contienen tritio y no pueden datarse. Aguas subterráneas sin ^3H se consideran “submodernas” o más antiguas. Es, por tanto, un indicador de excelencia para la datación

de las aguas del sistema de flujo debido, además, a su tiempo medio de vida de 12,43 años y a que es parte de la molécula de agua $^1\text{H}^3\text{HO}$ ó ^1HTO .

Tabla 1. Tritio en las lluvias de la estación de referencia OIEA-GNIPCU01 (CPHR, La Habana, Cuba; <http://nucleus.iaea.org/wiser/index.asp>) para el período 2002-2018

Indicador	Período lluvioso (mayo-octubre)		Período menos lluvioso (estiaje; noviembre-abril)	
	Para la serie original (cruda)			
<i>n</i>	99		84	
<i>Media aritmética</i>	1,668		1,522	
<i>Desviación estándar</i>	0,495		0,591	
<i>Coefficiente de variación</i>	0,297		0,388	
	Para serie homogeneizada			
<i>n</i>	93		78	
<i>Media aritmética</i>	1,67		1,45	
<i>Desviación estándar</i>	0,501		0,532	
<i>Coefficiente de variación</i>	0,30		0,37	

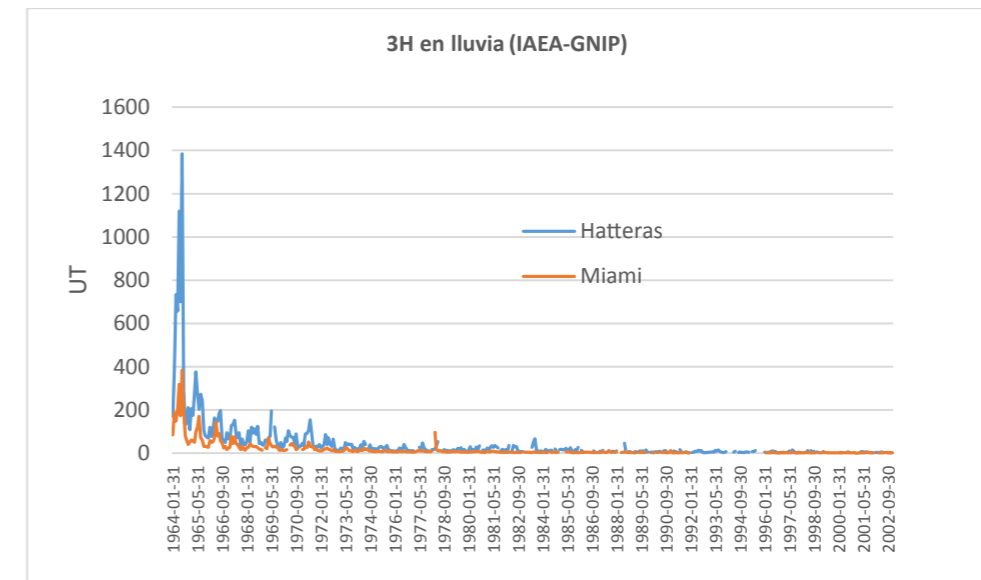


Fig. 12. Ritmo de la concentración de Tritio en las aguas de lluvia en las estaciones Hatteras y Miami (OIEA-GNIP; <http://nucleus.iaea.org/wiser/index.asp>) para el período común 1964-2002 (paso de tiempo mensual). La correlación lineal entre ambas estaciones para el período común de 0,92 para el 95% de certidumbre

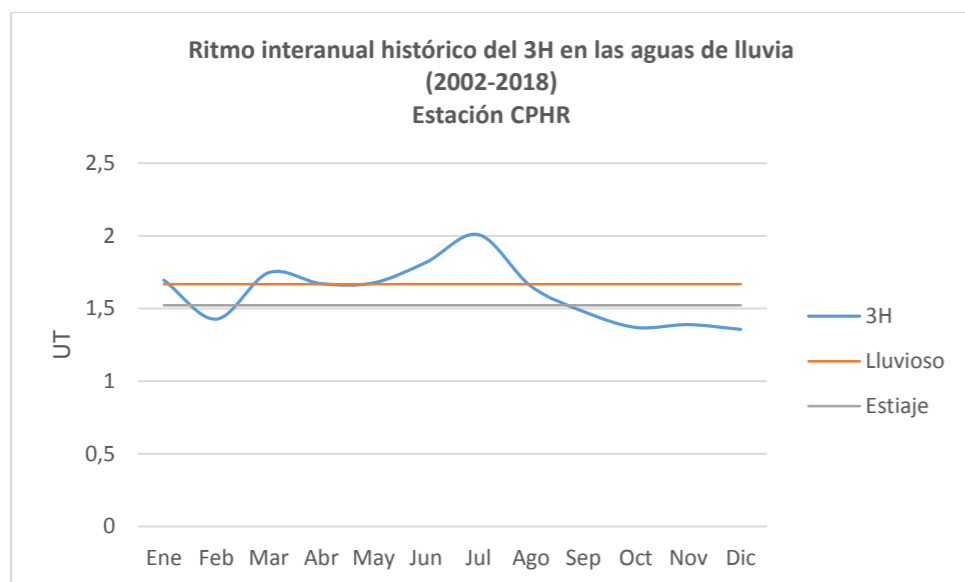


Fig. 13. Ritmo interanual histórico promedio del Tritio en las precipitaciones registrado en la estación OIEA-GNIPCU01 (CPHR, La Habana, Cuba; <http://nucleus.iea.org/wiser/index.asp>) para el período 2002-2018. Las líneas horizontales marcan los valores históricos promedio en el período lluvioso y el menos lluvioso (estiaje)

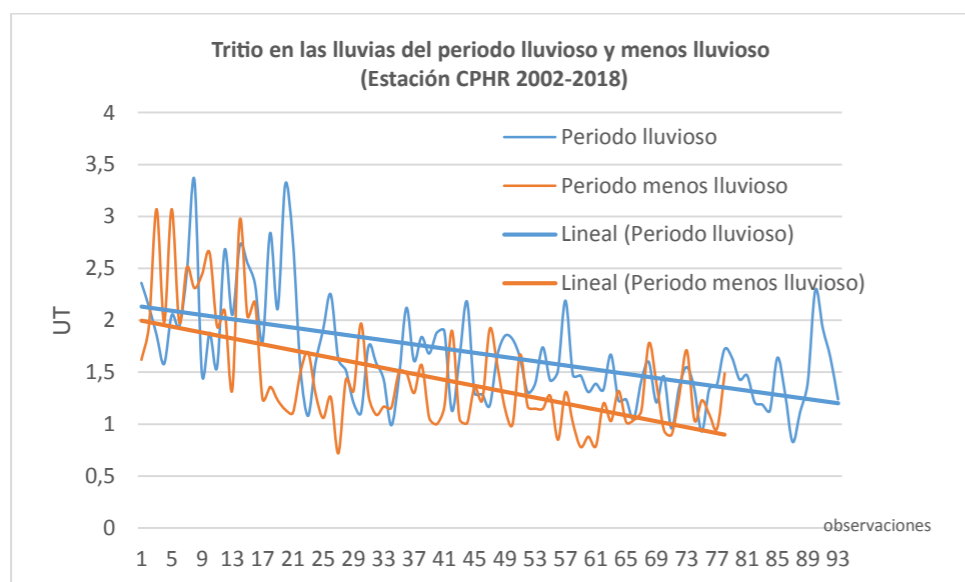


Fig. 14. Tendencias observadas para los periodos lluvioso y menos lluvioso del año (promedios históricos para 2002-2018 en la estación OIEA-GNIPCU01 (CPHR, La Habana, Cuba; <http://nucleus.iea.org/wiser/index.asp>)

En condiciones naturales, el ^3H es producido por la radiación cósmica, cuya tasa de producción se alteró considerablemente por los mencionados ensayos termonucleares en la atmósfera. Hacia 1990, la mayor parte del Tritio había sido lavado de la atmósfera y, en la actualidad, los niveles en la precipitación global son muy bajos o insignificantes. Casos aislados de pequeñas fugas de centrales nucleares o de armamentos imposibilitan que se alcancen niveles pre-1951, por ello, la señal de ^3H en las aguas subterráneas es indicativa de tritio termonuclear y muy útil para el fechado y la aclaración de los procesos de transporte de fluido en las aguas subterráneas. La interpretación cualitativa referencial de la data de ^3H propuesta por Clark y Fritz (1997) se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Interpretación cualitativa de la data de Tritio (Clark y Fritz, 1987). Entre paréntesis, y cursiva

	Unidades de Tritio (UT)	Referencias cronológicas
Para regiones continentales	0	Submoderna, edad superior a 100 años, sin recarga reciente
	0-5	Superior a 50 años o mezclas de aguas submodernas y con recarga reciente
	0,8-4	Mezcla entre recarga submoderna y reciente
	5-15	Moderna (<5 a 10 años)
	15-30	Presencia de algún ^3H termonuclear residual
	>30	Componente considerable de recarga entre 1960 y 1970
	>50	Dominante recarga de los 1960
Para regiones costeras y de baja latitud	0	Submoderna, edad superior a 100 años, sin recarga reciente
	0-5	Superior a 50 años o mezclas de aguas submodernas y con recarga reciente
	<0,8	Submoderna (recargadas antes de 1952)
	0,8-2	Mezcla entre recarga submoderna y reciente
	2-8 (5-7)	Moderna <5 a 10 años; (moderna o reciente, de 3-5 años)
	10-20	Presencia de algún ^3H termonuclear residual
	>20	Componente considerable de recarga entre 1960 y 1970

RESPUESTA ISOTÓPICA IMPULSIONAL DEL ACUÍFERO

Las variaciones espaciales y temporales a pequeña escala del contenido de Tritio en las aguas de lluvia han sido descritas por otros autores (Machta, 1969; McNughton, 1972; Östlund, 1967, 1968; IAEA, 2001; Gautam et al., 2013; van Roylem, 2019; Terzer-Wassmuth, 2022).

Bajo eventos de lluvia torrencial ciclónica, ya Östlund (1967) y también Gautam et al. (2013) han estudiado las particularidades de la distribución de Tritio en estos casos. Particularmente Östlund (1967) llama la atención sobre el hecho de que la concentración de Tritio en el vapor de agua en el aire no perturbado tropical es aproximadamente 10 veces más alta que aquel en el agua de mar, pero cuando este aire es arrastrado por un huracán la concentración de Tritio se reduce según el aire se aproxima al ojo del mismo. En un estudio más detallado del Huracán SS-3 Betsy (27 de agosto de 1965-14 de septiembre de 1965) durante cuatro días en que las características de la lluvia variaron, Östlund (1968) concluye que el intercambio molecular de agua en la interfaz entre el aire y el mar se manifestó claramente y la magnitud de ese intercambio se incrementó con el acrecentamiento de la intensidad del huracán, llegando a alcanzar una composición equivalente al 86% de vapor de agua de mar y 14% desde el exterior de la envolvente de la tormenta. La distribución de ^3H en un área entre 120 y 200 km de diámetros cambió drásticamente de un gradiente vertical dominante a una mezcla vertical y de ahí a un gradiente horizontal viene estructurado.

Las intensas lluvias y los acumulados tan notables alcanzados en los meses de junio a octubre de 2005, como consecuencia de los eventos de la TT Arlene (junio 8-10), los huracanes Dennis (julio 7-9), TT Franklin (julio 21), Katrina y Rita (septiembre 19-21), la DT Tammy (octubre 5-6) y el huracán Wilma (octubre 17-22), motivaron respuestas diferenciadas de las aguas subterráneas como consecuencia de la recarga cuasi instantánea de esas lluvias (Fig. 15). Los acumulados fueron asimismo notables (Fig. 16). En septiembre ya se estaba muy cerca de sobrepasar la media de lluvia anual histórica del país (1320 mm) y, en todos los meses la lluvia precipitada sobrepasó las medias históricas de esos meses.

En la serie de lluvia de la estación CPHR (Fig. 17) no se observa una asociación clara entre el contenido de Tritio y los acumulados de lluvia ciclónica (el valor de la correlación lineal es de 0,13). Las precipitaciones máximas asociadas a la TT Arlene se asocian a una disminución del contenido de Tritio en tanto que, durante el Huracán Dennis, que atravesó la zona, pero provocando menos acumulado de lluvia ascendieron los contenidos de Tritio. Durante julio y los meses siguientes, hasta octubre, decrece la lámina de lluvia y también el contenido de Tritio en las precipitaciones.

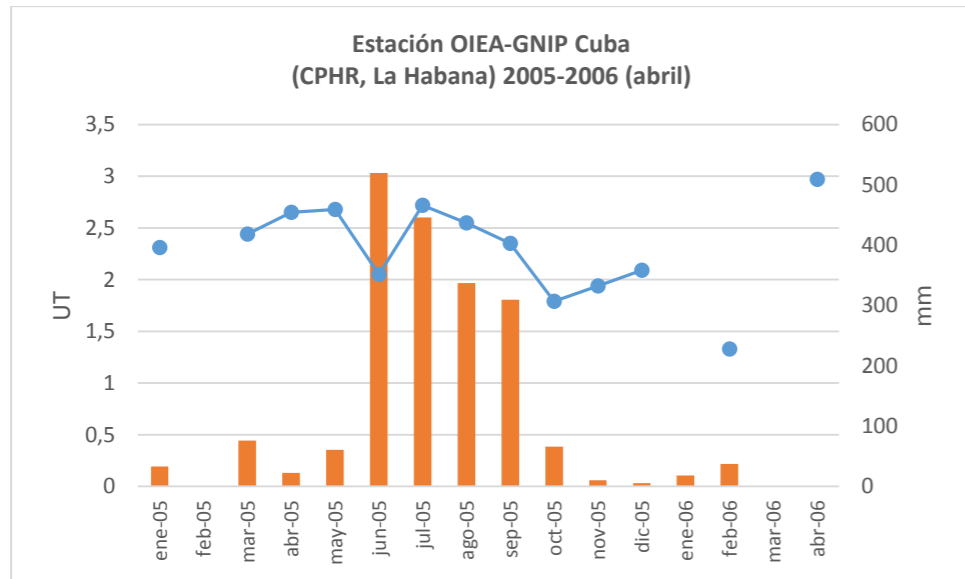


Fig. 15. Distribución de Tritio en las aguas de lluvia y láminas registradas en la Estación OIEA-GNIPCU01 (CPHR, La Habana, Cuba; <http://nucleus.iaea.org/wiser/index.asp>) durante el período de estudio

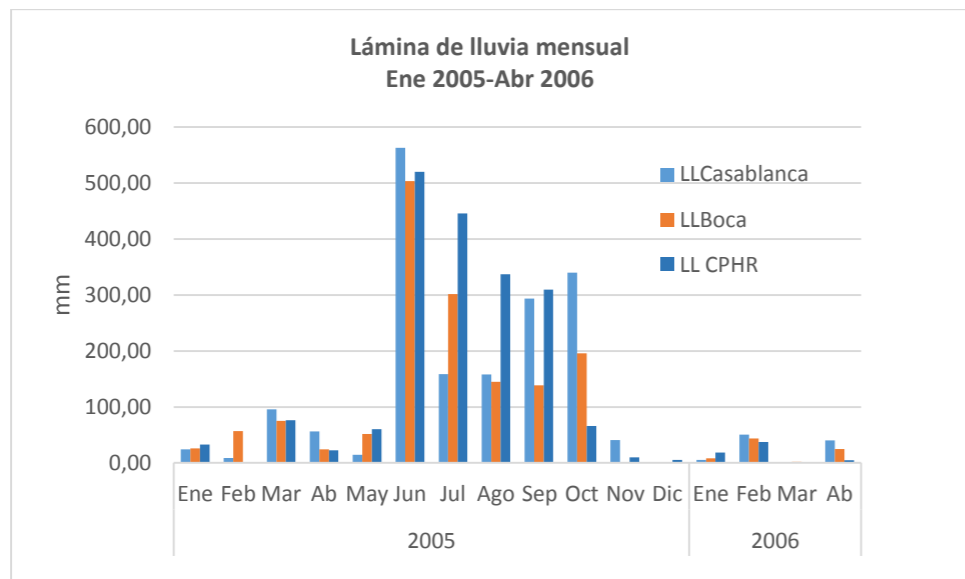


Fig. 16. Láminas de lluvia mensual de las estaciones de referencia CPHR, Boca de Jaruco y Casablanca para el periodo de estudio

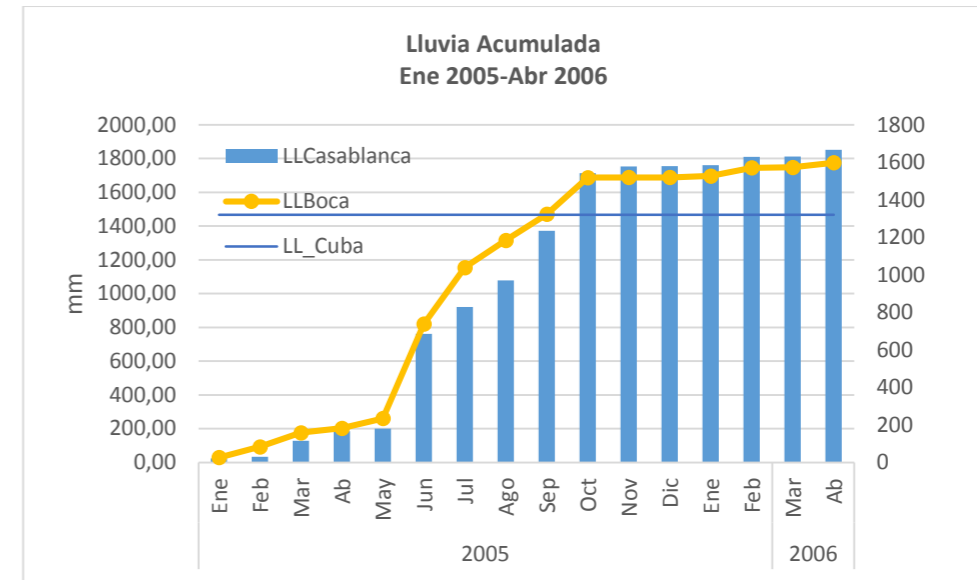


Fig. 17. Acumulados de lluvia para el periodo enero 2005-abril 2006 en las estaciones Casablanca (LLCasablanca) y Boca de Jaruco (LLBoca). LL_Cuba es la lluvia media histórica del país (1320 mm)

La respuesta impulsional identificada en las estaciones de monitoreo de las aguas subterráneas (Fig. 18) mostró complejas relaciones hidrodinámicas en la que aparecieron mezclas aguas subterráneas de diferente composición isotópica de tritio y radón y tiempos de residencia en respuesta a la intensidad de los factores de forzamiento. Las Figs. 19-24 muestran las respuestas de ^{222}Rn y ^3H a los eventos lluviosos del período.

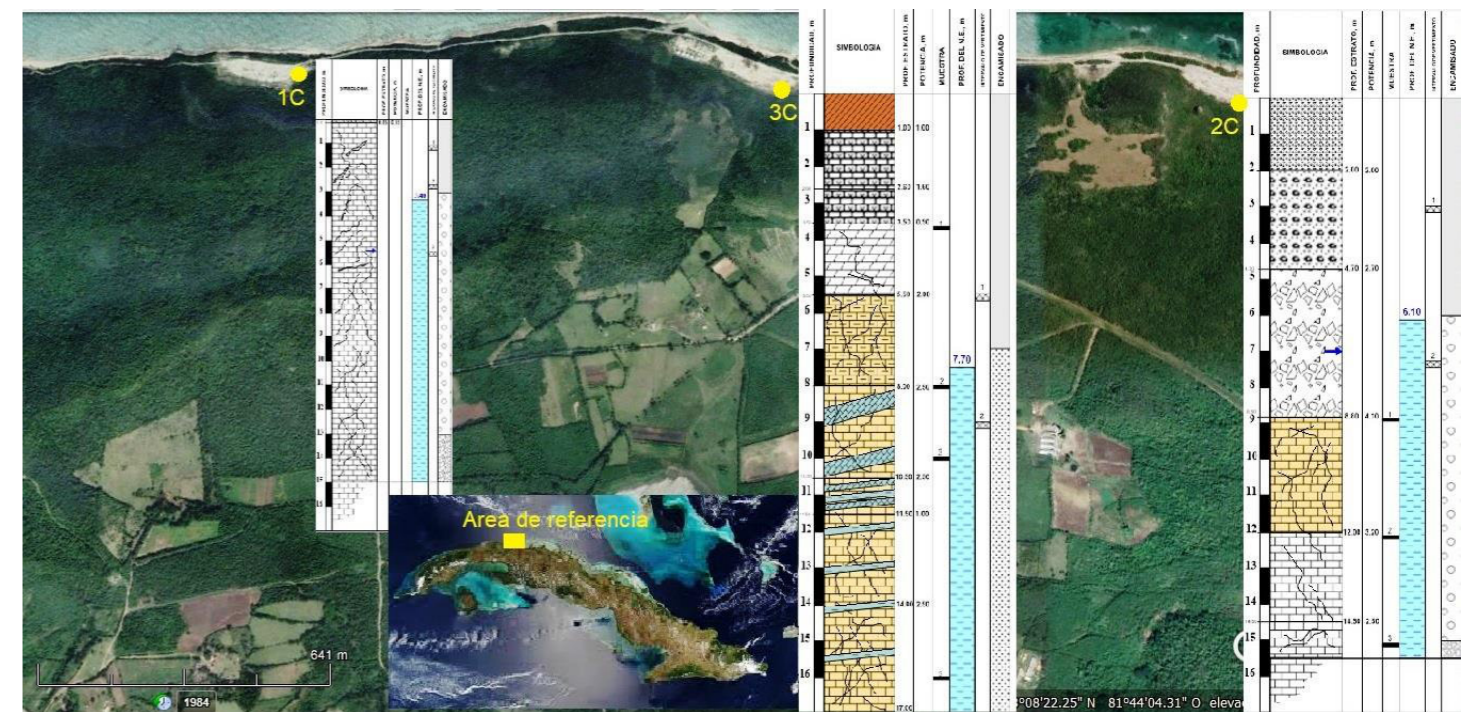


Fig. 18. Distribución de las estaciones de monitoreo de las aguas subterráneas.

La Tabla 3 agrupa cualitativamente los tiempos medios de residencia a partir de la actividad de tritio registrada en las muestras puntuales de cada mes del año 2005 hasta abril 2006.

Los resultados son interesantes, sobre todo porque cada estación de monitoreo representa un sistema de flujo muy local y no necesariamente dependiente uno del otro y, aun con las limitaciones que Suckow (2014) señala, muestran que:

- En condiciones no influenciadas por eventos extremos, sean déficits o excesos de precipitación, el acuífero drena una mezcla de aguas de diferentes horizontes y distintos tiempos de residencia de las aguas subterráneas
- Las lluvias huracanadas, en particular, movieron aguas más uniformemente asociadas a recargas anteriores a 1952 en las estaciones 1C y 2C durante seis (6) meses consecutivos. Una tendencia semejante parecía mostrarse en 3C pero el colapso del pozo impidió continuar el muestreo.
- Esa influencia parecía continuar en 1C en enero 2006, pero no puede asegurarse, porque en diciembre 2005 se detectaron aguas de infiltración submodernas a recientes; mas, sin embargo, 2C continuó la tendencia de drenar aguas pre 1952.
- Pero en febrero y marzo de 2006, tal como ocurrió en marzo 2005, en la estación 1C se registraron aguas asociadas a infiltraciones durante el periodo de explosiones termonucleares en la atmósfera (1960-1970). En 2C, ese mismo comportamiento se registró en febrero 2006. Ello sugiere que, en estiaje, estas estaciones drenan una mezcla de aguas donde dominan aguas recargadas en ese período.

Tabla 3. Análisis cualitativo de los tiempos medios de residencia de las aguas subterráneas en el acuífero Canasí (basado en los patrones de Clark y Fritz, 1997) para el periodo de muestreo enero 2005-abril 2006

Tritio	Evento	Pozo Mes	1C	TRES	2C	TRES	3C	TRES
2005		Ene	1,33	Mezcla submoderna/reciente	1,01	Mezcla submoderna/reciente	0,56	Pre 1952
		Feb	0,44	Pre 1952	0,37	Pre 1952	0,79	Pre 1952
		Mar	1,91	Mezcla submoderna/reciente	1,29	Mezcla submoderna/reciente	0,80	Pre 1952
		Abr	0,39	Pre 1952			0,39	Pre 1952
		May	71,40	1960-1970	1,15	Mezcla submoderna/reciente	1,01	Mezcla submoderna/reciente
	Arlene Dennis & Franklin	Jun	0,00	Pre 1952	0,52	Pre 1952		
		Jul	0,76	Pre 1952	0,33	Pre 1952		
	Katrina	Ago	0,24	Pre 1952	0,00	Pre 1952		
	Rita	Sep	0,48	Pre 1952	0,38	Pre 1952		
	Tammy & Wilma	Oct	0,60	Pre 1952	0,60	Pre 1952		
		Nov	0,48	Pre 1952	0,38	Pre 1952		
	Dic	1,40	Mezcla submoderna/reciente	0,40	Pre 1952			
2006		Ene	0,40	Pre 1952	17,70	TN Residual		
		Feb	72,00	1960-1970	77,90	1960-1970		
		Mar	72,00	1960-1970	3,00	5-10 años moderna		

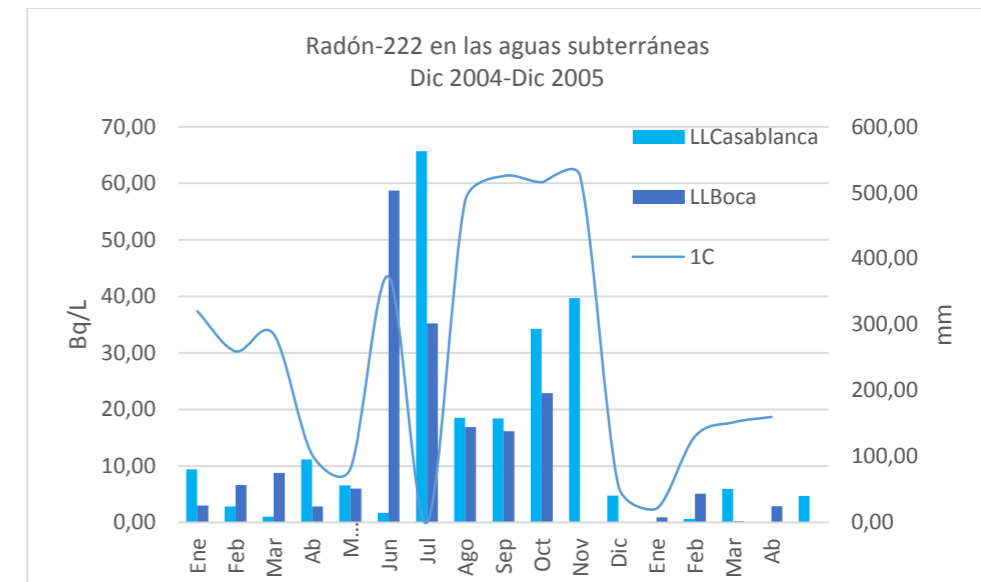


Fig. 19. Variación de la actividad de ²²²Rn con respecto a las lluvias asociadas a la temporada de huracanes 2005 en la estación de monitoreo 1C

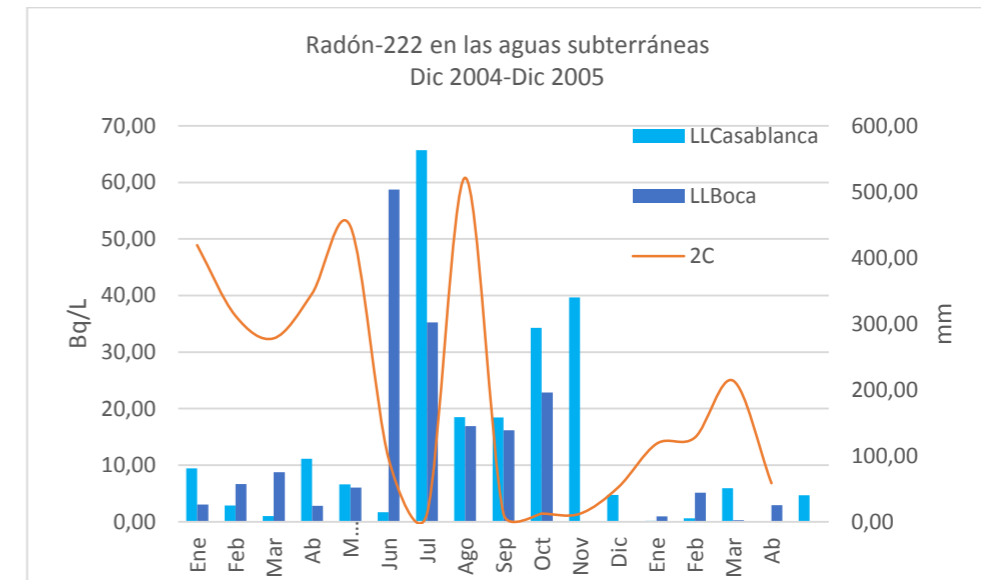


Fig. 20. Variación de la actividad de ²²²Rn con respecto a las lluvias asociadas a la temporada de huracanes 2005 en la estación de monitoreo 2C

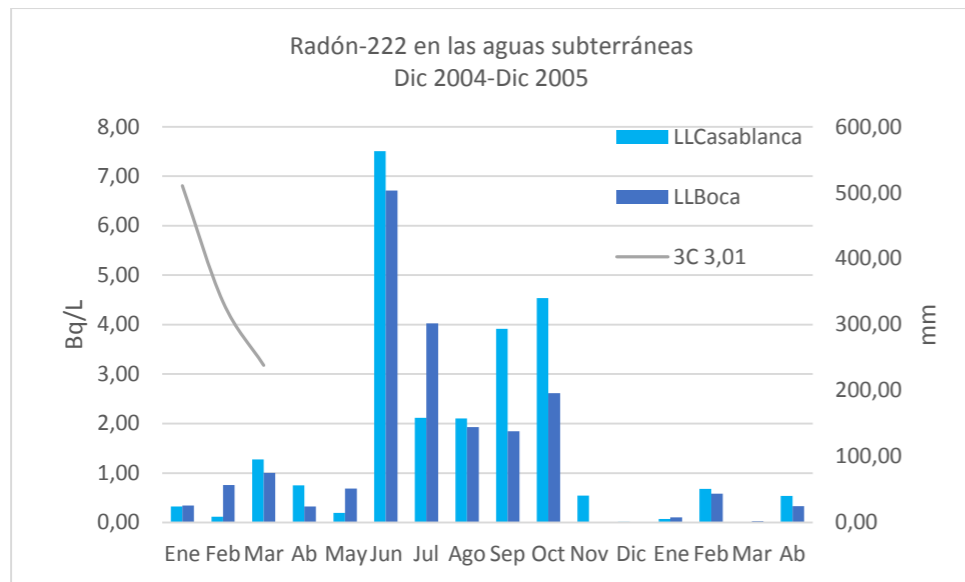


Fig. 21. Variación de la actividad de ^{222}Rn con respecto a las lluvias asociadas a la temporada de huracanes 2005 en la estación de monitoreo 3C

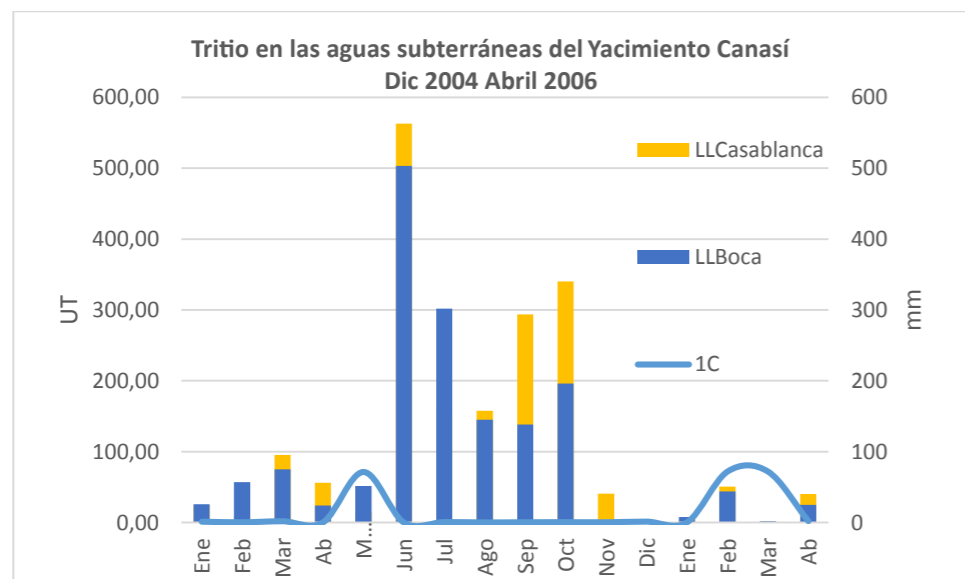


Fig. 22. Variación de la actividad de ^3H con respecto a las lluvias asociadas a la temporada de huracanes 2005 en la estación de monitoreo 1C

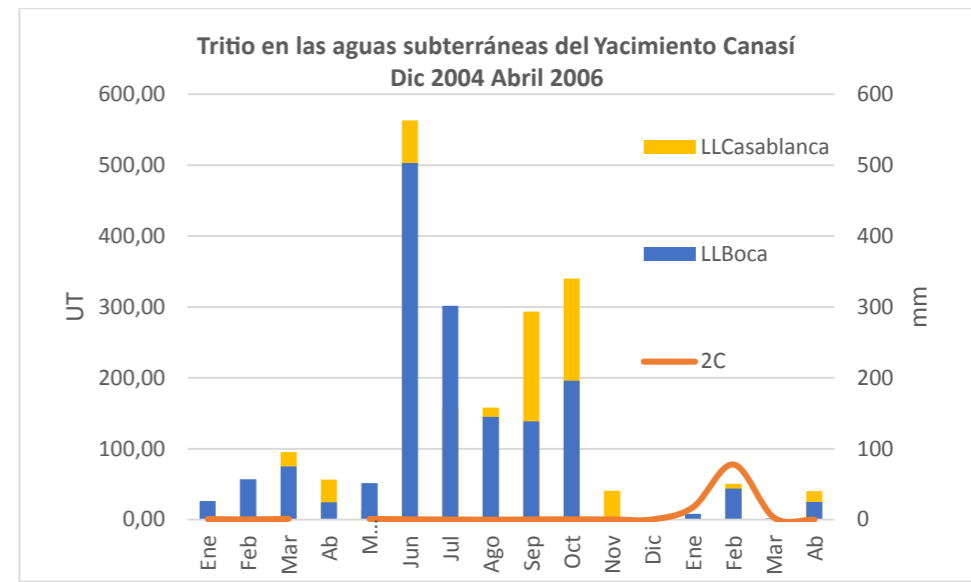


Fig. 23. Variación de la actividad de ^3H con respecto a las lluvias asociadas a la temporada de huracanes 2005 en la estación de monitoreo 2C

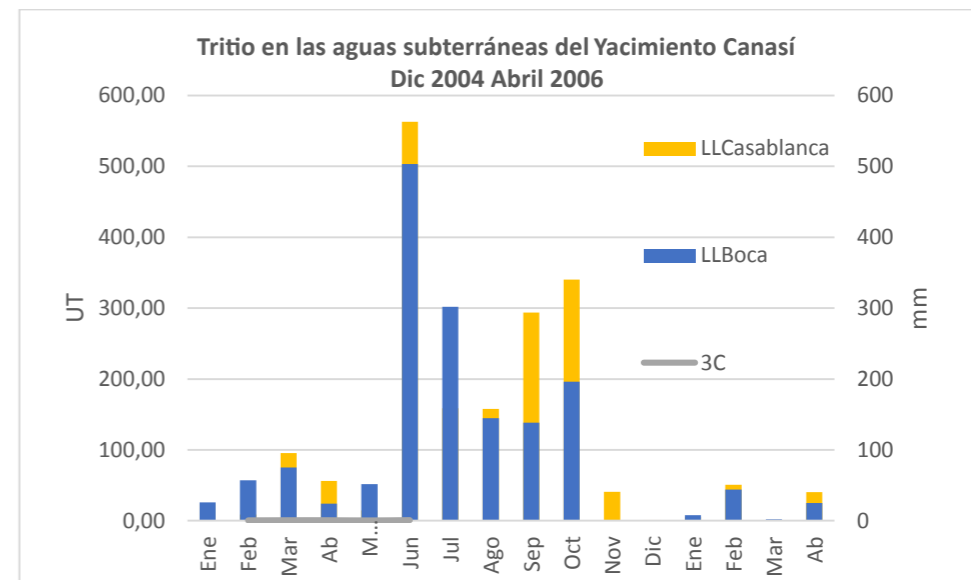


Fig. 24. Variación de la actividad de ^3H con respecto a las lluvias asociadas a la temporada de huracanes 2005 en la estación de monitoreo 3C

NOTA FINAL

Las aguas de lluvia asociadas a aguaceros torrenciales que recargan los acuíferos cársicos de manera instantánea o sostenida conducen a una respuesta impulsional del acuífero que se expresa notablemente en la mezcla de aguas de distinto origen y tiempo de residencia. Esta recarga, muchas veces brusca, modifica el régimen de las aguas subterráneas, introduciendo una componente de flujo a pistón sobre cualquier otra que predomine en el acuífero bajo régimen estacional normal de precipitaciones.

En el caso del Acuífero Canasí, el período 2005-2006 recibió una recarga instantánea del primer evento ciclónico de la temporada, a la que se sumó el porte persistente de un período anormalmente abundante de varios meses con láminas de

lluvia muy altas e intensas debidas a una época ciclónica excepcional. La forma, extensión y espesor del acuífero no dejan traslucir que el sistema de flujo se pudiera acomodar de manera tan notable y en un período de tiempo tan corto, a las condiciones impuestas por los sistemas ciclónicos que recargaron el sistema. Sin embargo, es evidente que la capacidad de autorregulación del acuífero cársico es sumamente alta y el sistema mueve reservas de agua subterránea más importantes de lo que, hasta ahora, se ha supuesto.

En próximos artículos este tema y la modelación del sistema de flujo serán abordados con mayor detenimiento.

RECONOCIMIENTOS

La Red de Monitoreo de referencia fue diseñada por Ana Margarita Sardiñas, Ernesto Rocamora y Leslie Molerio. Rocamora se encargó del control de perforación y construcción de la Red, en tanto Sardiñas y Molerio desarrollaron todas las campañas de monitoreo mensual de las aguas subterráneas y de un repositorio de residuos petrolizados entre diciembre 2004 y junio 2007, así como trabajos posteriores de documentación hidrogeológica entre 2021 y 2022. Las determinaciones de macroconstituyentes y microelementos fueron realizadas en el Laboratorio Central de Minerales (LACEMI), bajo la supervisión de Miriam Morales y Fabio Rojas Pimentel. Las muestras isotópicas fueron procesadas en el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) por Isis María Fernández Gómez, Jorge A. Carrazana González, Miguel Prendes, Reynaldo Gil y Eduardo Capote. La interpretación de la data fue favorecida por la asistencia de los especialistas del CPHR Fernández Gómez, Carrazana, Gil y Capote así como, en su momento, de Piotr Maloszewski[†] (instituto de Hidrología de Múnich, Alemania) y más recientemente de Luis Araguás (Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena). Al Prof. Arrigo Cigna (Italia), quien mucho contribuyó con sus amables sugerencias, experiencias y abundante literatura especializada.

La Habana, Enero 6/2022

REFERENCIAS

Acevedo Rosas, Federico, Antonio Luna Díaz-Peón (2005): **4. Principales fenómenos meteorológicos que afectaron al Estado de Veracruz en el año 2005**. En /Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz, :53-66

Arellano Acosta, Daniela M.; B. Degournay; J. Gutiérrez Díaz; L.F. Molerio León; O. Ascanio & A. Santos (1993): **Isotope Hydrogeochemistry in the Study of Saline Aquifers. Case of Study-Isle of Youth, Cuba**. Symp. Isotope Tech. in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere, IAEA, Vienna, Paper IAEA-SM-329/27P:514-516

Arellano, D.M.; L.F. Molerio León & A. Santos Sanamé (1993): **Dinámica del Flujo Regional en el Macizo Metamórfico de la Isla de la Juventud**.in/ Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 1994, IAEA TECDOC-835, Viena, :175-194Maracaibo, Venezuela, 14:

Arellano Acosta, M.; L.F. Molerio León & A. Surí Hijos (1992): **¿Efecto de Altitud del ¹⁸O en la Zona de Articulación de Llanura Criocársica con Carso de Montaña?** GTICEK. Taller Internac. sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló :29-42

Avila Lixion A., Daniel P. Brown (2005): **Tropical Cyclone Report. Tropical Storm Arlene 8-13 June 2005**. National Hurricane Center, 20 Jul, 2005, 14:

Beven, Jack (2005): **Tropical Cyclone Report. Hurricane Dennis 4 – 13 July 2005**. National Hurricane Center, 22 Nov. 2005, National Hurricane Center 14:

Carrazana González, J., O. Dominguez Ley, G. Åkerblom, L.Molerio León and R.Gil Castillo (2010): **Exposure to radon in tourist caves in Cuba**. Int. J. Low Radiation, Vol. 7, No. 2, 2010, :133-13

Cigna, A, A. (2005): **Radon in caves**. International Journal of Speleology, 34 (1-2), 1-18. Bologna (Italy)

Clark, Ian D., Peter Fritz (1997): **Environmental isotopes in Hydrogeology**. Lewis Publishers., Boca Raton, New York, 328:

Cobas Gómez, Lisset Susana Cobas-Gómez, Roberto Piñeiro-Soto. Regla Duthit-Somoza (2010): **Variabilidad de las llluvias en la zona suroccidental de Cuba y su relación con los ciclones tropicales**. Rev. Cubana Invest. Pesqueras, enero-diciembre, 2010, 27(1): 26-32, <http://hdl.handle.net/1834/4114>

Dapeña, C., J.L. Peralta Vital, R. Gil Castillo, D. Leyva Bombuse, H.O. Panarello, I. M. Fernández Gómez, L.F. Molerio León, M. Pin (2006): **Caracterización isotópica de la Cuenca kárstica Almendares-Vento, Cuba. Resultados Preliminares**. XI Congr. Geol.. Chileno, Antofagasta, Actas. Vol. 2, Simp. Hidrogeol.; 607-610

Espinosa G. Guillermo C (2016): **Gas Radón en cuevas. Su origen, medición, distribución, y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública**. Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México Circuito de la Investigación Científica, México, 138:

Fernández Gómez, I.M., J. Tomás Zerquera, J. Carrazana González, E. Capote Ferrera G. Rodríguez Castro (2006): **Análisis de la Radiactividad en el Balneario “Elguea”, Villa Clara, Cuba**. Primer Congreso Americano del IRPA 2006/XXIV Reunión Anual de la SMSR y XVII Congreso Anual de la SNM/Acapulco México, del 4 al 8 de Septiembre 2006/ Memorias CIC Acapulco 2006 en CD ROM 1/6

Farris, Gaye S. (2005): **The Major Hurricanes of 2005: a Few Facts**. Science and the Storms: the USGS Response to the Hurricanes of 2005. United States Geol. Surv., National Wetlands Research Center, :12-15

Gautam, Y. P., Saivajay Sharma, A. K. Sharma, Aviansh Kumar, P. M. Ravi, P. K. Sarkar (2013): **Studies on the Rain Scavenging Process of Tritium in a Tropical Site at Narora in India**. Journal of Nuclear Chemistry article ID 849732, 6:

Hernández Unzón, Alberto, Cirilo Bravo (2005): **Resumen de la Tormenta Tropical “Arlene” del Océano Atlántico Junio 8-13, 2005**. Comisión Nacional Del Agua, México, 2:

IAEA (2000): **Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and Applications. Vol. 6. Modelling**. Water resources Programme. IAEA-UNESCO, Vienna:491-570

IAEA (2000): **Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and Applications. Vol. 2. Atmospheric Water**. Water resources Programme. IAEA-UNESCO, Vienna:167-235

IAEA (2003): **Radiation protection in the management of radioactive waste in the oil and gas industry**. Safety Rep. Series 34, Vienna, 127:

IAEA (2005): **Naturally occurring radioactive materials (NORM IV)**. Proc. Internatl. Conf., Szczyrk, Poland, 17–21 May 2004, IAEA-TECDOC-1472, Vienna, 574:

- Machta, L. (1969): **Evaporation rates based on tritium measurements for hurricane Betsy**, Tellus, 21:3, 404-408
- McNaughton, D. L. (1972): **Tritium in rain as an indicator of air mass source**. Tellus XXIV (3):255-259
- Molerio León, Leslie F. (1992): **Composición Química e Isotópica de las Aguas de Lluvia de Cuba**. II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba: 20-21
- Molerio León, Leslie F. (1993): **Dinámica del Flujo Regional en el Macizo Metamórfico de la Isla de la Juventud**. Taller sobre Aplicación de Técnicas Isotópicas en el Estudio de los Recursos y la Contaminación de las Aguas, OIEA,
- Molerio León, Leslie F. (1994): **Isotopic and Geochemical Regionalization of a Tropical Karst Aquifer**. Internatl. Symp. Isotopes in Water Resources Management; OIEA, Vienna, Austria, Paper IAEA-SM-336/88P, 6:
- Molerio León, L.F. (2001): **Speleothems and Climatic Changes: Equilibrium and Kinetic Fractionation Effects in Cave Deposits**. IAEA International Conference On the Study of Environmental Change Using Isotope Techniques., IAEA-CN-80/P-20:143-145
- Molerio León, L.F. (2004): **Cave levels, safe yield and turnover time in karst aquifers**. IAEA-CN-104/P-76. Proc Isotope hydrology and integrated water resources management, Vienna, Austria :184
- Molerio León, L.F. (2006a): **Radón 222, Tritio, intrusión marina y contaminación por hidrocarburos en acuíferos cársticos litorales**. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (108), Madrid, Abril: 25-30.
- Molerio León, L.F. (2006b): **Isotopic evidence of the overexploitation of karst aquifers**. in: Demuth, S., A. Gustard, E. Planos, F. Scatena, E. Servat (Eds.) **Climate Variability and Change: Hydrological Impacts**. IAHS Publ. 308, Wallingford. Climate: 629-634
- Molerio León, L.F. (2007a): **Tritium as an indicator of groundwater overexploitation in a tropical karst aquifer**. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in sustainable Water Resources Management, Vienna, Austria, 21-25 May, 2007. IAEA-CN-151/125
- Molerio León, L.F. (2007b): **Radon 222 and Tritium in the prevention of sea water intrusion and oil pollution in a coastal karst aquifer**. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in sustainable Water Resources Management, Vienna, Austria, 21-25 May, 2007. IAEA-CN-151/124.
- Molerio León, L.F. (2008): **Una Revisión del Uso de Tritio Cosmogénico en el fechado de aguas subterráneas y su aplicación en el Acuífero Kárstico de la Cuenca de Vento, Cuba** Bol. Soc. Venezolana Espeleol. 42: 20-32
- Molerio León, L.F. (2009): **Sources of uncertainty of Rn-222 fluxes in coastal karst oil fields of the humid tropics: The Cuban experience. Abstract submitted**. IAEA/WMO Technical Meeting on Sources and measurements of radon and radon progeny applied to climate and air quality studies, 22 – 24 June 2009.
- Molerio León, L.F. (2012): **Hidrología de Trazadores en la gestión ambiental de yacimientos de petróleo onshore**. Mapping Interactivo. No. 154, Julio-Agosto, 2012:6-43
- Molerio-León, L.F. (2020a): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársticas de Cuba: 3. Composición isotópica de las aguas de lluvia**. Gota a gota, nº 22: 70-82 <https://www.researchgate.net/publication/348402581>

- Molerio-León, L.F. (2020b): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársticas de Cuba: I. Aplicaciones del nomograma modificado de Schoeller**. Gota a gota, 21: 81-88. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.). https://drive.google.com/file/d/1-7T5OrVnMe_rIEyVuA2ZuBtyrR1oAZ4V/view
- Molerio-León, L.F. (2020c): **Miembros geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársticas de Cuba: II. Aplicaciones del nomograma modificado de Schoeller – Metodología e Interpretación**. Gota a gota, (22): 13-17. <https://drive.google.com/file/d/10NQ25dn1EoGvwj71fxFTaTwPUL3q6Gv7/view> <https://www.researchgate.net/publication/345344552>
- Molerio León, L.F., I. M. Fernández Gómez y J. A. Carrazana González (2012a): **Radón 222 y Tritio en la identificación y cuantificación de la contaminación por hidrocarburos (LFNA) en las aguas subterráneas. 1. Principios teóricos**. Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. Año 13, No.24, 2012 ISSN-1683-8904, La Habana, 7:
- Molerio León, L.F., I. M. Fernández Gómez y J. A. Carrazana González (2012b): **Radón 222 y Tritio en la identificación y cuantificación de la contaminación por hidrocarburos (LFNA) en las aguas subterráneas. 2. Patrones de 222Rn, 3H y Cl**. Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. Año 13, No.24, 2012 ISSN-1683-8904, La Habana, 7: <http://ama.redciencia.cu/articulos.php?sid=91529a91e366de61e4ac7b8e3f27fb89>
- Molerio León, L.F.; J. Guarch, M.G. Guerra Oliva, J.C. Torres, E. Rocamora Alvarez (2001): **¹⁴C Evidence of Environmental Changes at The Seboruco Cliffs, The Oldest Archaeological Site in Cuba**. IAEA International Conference On the Study of Environmental Change Using Isotope Techniques., IAEA-CN-80/48:49-50
- Molerio León, L.F., P. Maloszeswski, M.G. Guerra Oliva, D.M. Arellano, K. del Rosario (2002): **Hidrodinámica isotópica de los sistemas acuíferos Jaruco y Aguacate, Cuba**. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXIII (2):3-9
- Molerio León, Leslie F.; P. Maloszewski; M.G. Guerra Oliva; O. A. Regalado; D. M. Arellano Acosta; C. March Delgado & K. del Rosario (1993): **Dinámica del Flujo Regional en el Sistema Cársico Jaruco-Aguacate, Cuba**. in/ **Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 1994**, IAEA TECDOC-835, Viena, :139-174
- Molerio León, L.F. y J. Pajón (2004): **Cambios climáticos y espeleotemas: efectos del equilibrio y el fraccionamiento isotópico en depósitos de cavernas**. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (92), Madrid, Marzo:88-91.
- Molerio León, L.F., M. Pin, M.G. Guerra (2007): **Diseño de la Red de Monitoreo de Tritio en las Aguas Subterráneas de la Cuenca de Vento, Habana, Cuba**. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra, Madrid, Octubre-Noviembre, 32:
- Molerio León, L.F., K. del Rosario, J.C. Torres Rodríguez, E. Rocamora Alvarez, M.G. Guerra Oliva (2002): **Factores de control de la composición química e isotópica de las aguas subterráneas en la región Varadero-Cárdenas, Matanzas, Cuba**. Ing. Hidr. y Ambiental, La Habana, XXIII (2):36-46
- Östlund, H. Göte (1967): **Hurricane Tritium I: Preliminary results on Hilda 1964 and Betsy 1965**. In/ Stout, G. E.: **Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle. Papers presented at a Symposium at the University of Illinois**. Nov. 10-12, 1965 (1967). Geophys. Monogr. Ser. 11:58-60
- Östlund, H. Göte (1968): **Hurricane Tritium II: Air-sea exchange of water in Betsy 1965**. Tellus 20(4): 577-594. <https://www.researchgate.net/publication/227594332>

Peralta Vital, J.L., R. Gil Castillo, L.F. Molerio León, D. Leyva Bombuse, C. Dapeña, H. O. Panarello, J. Carrazana González, M. Pin (2006): **Uso de la hidrología isotópica en la evaluación de una importante cuenca cársica cubana, para la gestión sostenible de sus recursos hídricos.** VIII Congr.Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Asunción, Paraguay, Septiembre,: 1-22

Ramos Guadalupe, Luis Enrique (2009): **Huracanes. Desastres naturales en Cuba.** Edit. Academia, La Habana, 192:

Schmidt, Axel, Gabriele Frank, Willibald Stichler, Lars Duester, Thomas Steinkopff, Christine Stumpp (2020): **Overview of tritium records from precipitation and surface waters in Germany.** Hydrological Processes. 2020;34:1489–1493

Suckow, Axel (2014): **The age of groundwater. Definitions, models and why we do not need this term.** Applied Geochemistry 50 (2014) 222–230

Terzer-Wassmuth, Stefan, Luis J. Araguás-Araguás, Lorenzo Copia, Leonard I. Wassenaar (2022): **High spatial resolution prediction of tritium (3H) in contemporary global precipitation.** Nature Scientific Reports 12:10271

USGS (1999): **Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Produced Water and Oil-Field Equipment—An Issue for the Energy Industry.** USGS Fact Sheet FS–142–99, September 1999. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey

Van Rooyen, J., J. Miller, L. Palcsu (2019): **Spatial Variability of Tritium in Precipitation During Single Storm Events and its Bearing on Hydrological Studies.** <https://www.researchgate.net/publication/34167170>

Zapata Martí, Ricardo (2006): **Los efectos de los desastres en 2004 y 2005: la necesidad de adaptación de largo plazo.** CEPAL, Punto Focal de Evaluación de Desastres, S E R I E estudios y perspectivas, México, D. F., 47:

FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL KARST CUBANO

Leslie F. Molerio-León¹

Ana Margarita Sardiñas Gómez²

INVERSIONES GAMMA, S.A.

Apartado 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba

1. Email: especialistaprincipal@gmail.com

2. Email: anuchy54@gmail.com

RESUMEN

Este artículo pasa revista a los principales problemas conceptuales y metodológicos hidrológicos, hidrogeológicos, hidráulicos, hidrodinámicos, de la formalización matemática, del cálculo y del procesamiento del dato base y la generación de información que constituyen fuentes de incertidumbre en la determinación y aprovechamiento sostenible de los recursos de aguas subterráneas cársicas de Cuba que inducen o pueden inducir a errores notables de interpretación del régimen, la composición química e isotópica y la calidad de las aguas terrestres en el karst.

Palabras clave: *agua subterránea, Cuba, incertidumbre, karst, recursos*

ABSTRACT

This paper reviews the main sources of uncertainty in the evaluation and sustainable management of Cuban karst ground water resources derived from hydrologic, hydrogeological, hydraulic, hydrodynamic, assessment, mathematic formalization and data. These uncertainties induces remarkable inaccuracies in the interpretation of the regime, chemical and isotopic composition and quality of karst water resources.

Key words: *Cuba, groundwater, karst, water resources*

INTRODUCCIÓN

Las políticas de desarrollo social y económico desde la escala local a la nacional requieren del conocimiento detallado de la disponibilidad de agua para diferentes objetivos. El cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS-6 de la Agenda 2030 de Naciones Unidas, en el tema de Agua limpia y Saneamiento se basa en acciones “*para asegurar el agua potable segura y asequible universalmente*” debido a que la “*decreciente disponibilidad de agua potable de calidad es un problema importante que aqueja a todos los continentes*” (<https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>). Pero aun cuando el problema se resume en la ejecución de “*inversiones adecuadas en infraestructura, proporcionar instalaciones sanitarias y fomentar prácticas de higiene*”, un tema central a resolver es conocer los recursos hídricos disponibles y el modo de aprovecharlos de manera sostenible. Como el agua es imprescindible para todas las actividades y los ecosistemas, el ODS 6 además, es transversal a los restantes 17 objetivos.

El karst en general se caracteriza por ser un medio altamente permeable, que permite el desarrollo de importantes acuíferos que han servido de fuente de abasto para múltiples usos desde tiempos inmemoriales, pero para Cuba su importancia es trascendental. Como en ocasiones recientes hemos mencionado (Molerio, 2022, 2023; Molerio y Sardiñas, 2023) el karst cubano se extiende sobre una superficie aproximada de –hasta ahora- 72 630 kilómetros cuadrados, un poco más del 66% del área total del país, de los cuales 64 587 km² corresponden a tierra firme (10 882 a las zonas montañosas y 61 748 llanuras). Se incluyen 2 839 km² de sistemas o aparatos sin regionalizar hidrogeológicamente que

corresponden, 1 336 km² al karst de los cayos e isletas del archipiélago y el resto (1 503 km²) a zonas de elevaciones (Fig. 1). En las llanuras, se concentran numerosos núcleos poblacionales urbanos y rurales, industrias, centros educacionales, y de turismo y recreación, instalaciones agrícolas y ganaderas, y otros que, en mayor o menor grado, requieren del empleo racional y del suministro de agua potable cualitativa y cuantitativamente correspondientes con sus necesidades actuales y perspectivas. De estas llanuras cársicas acuíferas, la absoluta mayoría forman karsts litorales, permanentemente amenazadas por el avance, tierra adentro, de la intrusión marina (Fig. 2).

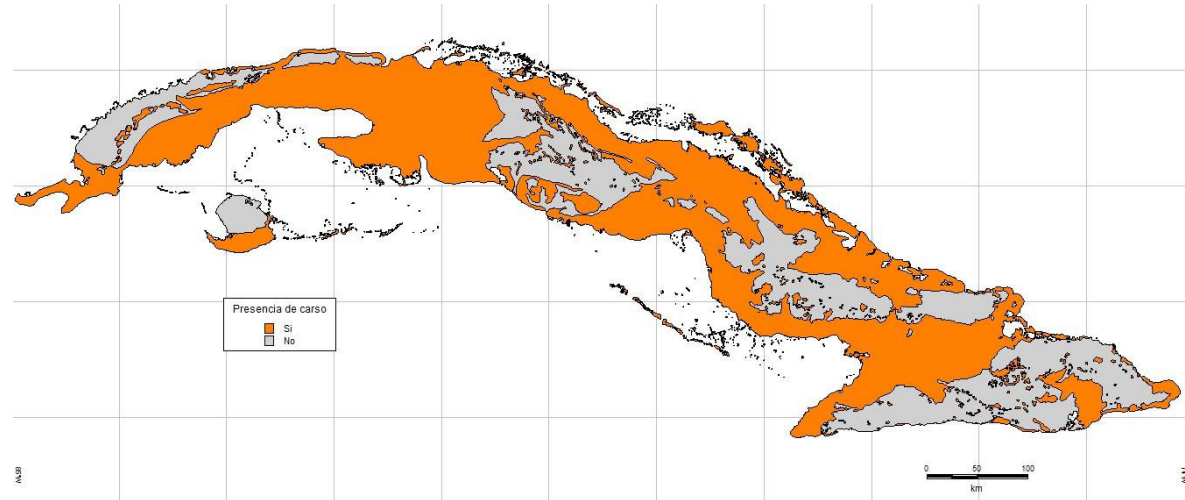


Fig. 1. Esquema general de distribución de las áreas cársicas de Cuba (basado en la distribución geográfica de las rocas carsificables, básicamente carbonatadas, según el Atlas Nacional de Cuba, 1989).



Fig. 2. El 44% de los 5745,9 km de costas de Cuba constituyen el límite marino de los potentes acuíferos cársicos en rocas miocénicas como puede observarse en la Fig. 3 (Foto del autor).

De los 6,3 km³ de recursos de agua subterráneas (Fig. 3) que se estima dispone el país (según las evaluaciones oficiales o estudios complementarios de Berri et al. 1975 e INRH, 1986, 2000; Dorticós et al. 2012; Batista, 1973, 1974, 2016; Planos, Rivero y Guevara, 2013; Piñón y González, 2014; Morejón et al. 2015; González y Domínguez, 2019; Planos, 2022a, 2022b,

Planos y Gutiérrez, 2020; Molerio y Sardiñas, 2023), casi el 80 % se encuentra en estos territorios cársicos, donde se distribuye el 95% de la superficie de las cuencas hidrogeológicas cubanas reconocidas por la institución rectora, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Por su relación con los ecosistemas que crea, sostiene o interactúa, es transversal a la mayor parte de la sociedad, la economía y el medio ambiente. También en él se encuentran yacimientos de petróleo, importantes minerales útiles, la mayor parte de los suelos agrícolas cubanos y prácticamente las cuatro quintas partes de la población del país se sirve o aprovecha sus recursos naturales.

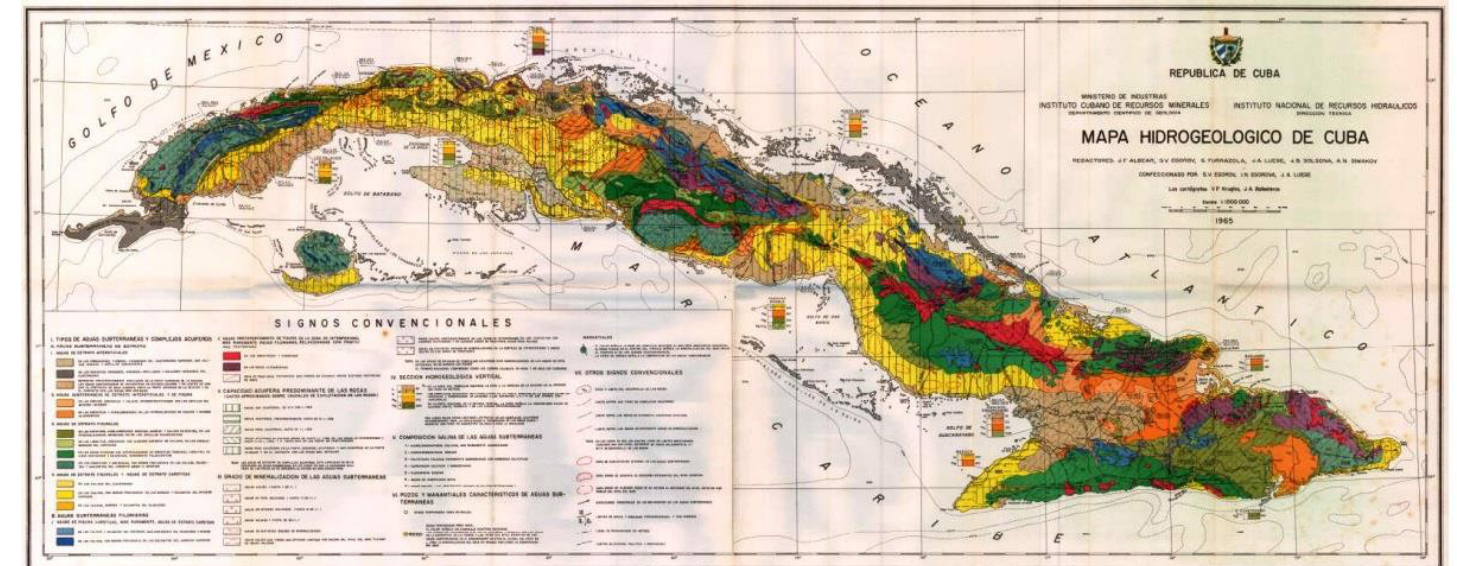


Fig. 3. Mapa Hidrogeológico de Cuba de (Egorov y Luege, 1965) en el que puede observarse el dominio del karst en las aguas subterráneas de Cuba (Molerio y Sardiñas, 2023)

La evaluación de los recursos hídricos en el karst cubano está signado por una gran incertidumbre asociada a los indicadores de base de los métodos de cálculo que se apliquen (hidráulico, hidrodinámico, recesión, hidroquímica, balance) tales como: periodo de observación seleccionado, representatividad y fiabilidad de los datos, precisión de los límites de los sistemas de flujo y de las relaciones verticales y horizontales de los acuíferos que los componen, el período de tiempo de las observaciones que se toman como base, el conocimiento de la estructura del campo de propiedades físicas, las direcciones de flujo y hasta la propia conceptualización del acuífero, entre otras. Los recursos de los acuíferos cársicos cubanos han sido determinados por diferentes métodos bajo condiciones muy variables de precisión y exactitud de los datos de base. Esas son las razones por las cuales puede disminuir la confianza en los volúmenes totales que se adopten, restricción que debe ser tomada en cuenta en el planeamiento del aprovechamiento de las aguas subterráneas.

A los recursos de agua subterránea de Cuba reconocidos oficialmente les falta la garantía de haber sido calculados por una metodología única y uniforme. Su intercomparación no es válida y el efecto negativo de la propagación de incertidumbre es incalculable. La semejanza en las diferentes cifras que ofrecen diferentes autores se debe más a las diferencias con los valores estimados por diferentes autores de los recursos superficiales que a la precisión con que se han calculado los recursos subterráneos. Adicionalmente, para ordenar el balance nacional del agua y planificar el desarrollo social y económico del país se requiere conocer la precisión con la que han sido calculados los recursos hídricos subterráneos desde el nivel de sistema de flujo local al regional (Planos, Rivero y Guevara, 2013; Díaz Duque, 2018; Planos, 2022).

Este artículo dedica su atención a comentar las fuentes de incertidumbre de los métodos adoptados para el cálculo de los recursos de agua subterránea y su influencia en el balance hídrico nacional, con especial atención a los modelos conceptuales, la actualización de las metodologías de investigación, el régimen de monitoreo y a las particularidades específicas de gestión del agua en el karst.

RESERVAS Y RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los conceptos de reservas y recursos de aguas subterráneas se adoptaron en Cuba bajo la influencia de los especialistas soviéticos, búlgaros y, en menor grado, checos, que brindaron un notable aporte a la exploración y sistematización del conocimiento hidrogeológico del país a partir de los años 60 del pasado siglo. Estos estudios fueron compartidos y sirvieron de aprendizaje a los hidrogeólogos cubanos que participamos o continuamos con estas evaluaciones que, aunque muy pocas se han publicado, los resultados han sido descritos en decenas de informes inéditos básicamente elaborados desde el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (Vrba y Dvorak, 1967; Egorov, 1967; Martashvili, Luege y Lapshin, 1967; Kuzmin, Lapshin y Luege, 1968; Lapshin, Oscotski e Iturralde, 1968; Bobes, 1974; Bobes y Molerio, 1973; Berri et al., 1975; López y Solovey, 1987; Molerio, 1975, 1982, 1989a, 1989b, 2014; Varela, Molerio y Guerra, 1978; Molerio et al., 1996, 1997, 1998, 2006a; Batista, 2016; López, Santander y Estapé, 2001; De Miguel, 1996, 1999, 2001, 2012; De Miguel y Vázquez, 2005; Sánchez-Sánchez, De Miguel y Rochenel, 2009; FAO, 2015).

Los conceptos aun hoy son ciertamente algo confusos, al provenir de diferentes escuelas de pensamiento¹, pero en esencia, las reservas se refieren a la cantidad de agua subterránea y los recursos a aquellos volúmenes que es posible extraer mediante sistemas de captación y fue Savariensky (1934) quien los introdujo en la práctica hidrogeológica de la época. Mijailov (1989) destaca que ello se debe a la singularidad hidrodinámica de los sistemas de flujo subterráneo y a la necesidad de que esos conceptos definan: a) la cantidad de agua que recibe la capa acuífera en condiciones naturales o al realizar las tareas hidroeconómicas previstas; b) la cantidad de agua presente en los horizontes acuíferos y c) la cantidad de agua subterránea que puede ser explotada mediante obras e instalaciones.

De Miguel (1999) sintetiza algunas variaciones de los conceptos en la Tabla 1, al que se han incorporado los de otros autores (Schoeller, 1962; Siline-Beckchourine, 1964; Kóvacs et al., 1972; Bindeman y Yazvin, 1976; Mijailov, 1989; Pérez Franco, 1995). **Los términos “reservas de explotación” y “recursos de explotación” son sinónimos** (Mijailov, 1989), por lo que, en este sentido, conceptualizan *“la cantidad de dichas aguas que pueden ser obtenidas por obras de captación racionales desde el punto de vista técnico-económico, con un régimen de explotación dado y cuando la calidad del agua satisface las reivindicaciones en el transcurso de todo el plazo calculado para el consumo. Esta magnitud, por lo tanto, constituye el rendimiento de la obra² y se expresa en unidades de caudal...el término “reservas de explotación” se usa al examinar las perspectivas...del...posible aprovechamiento de las aguas subterráneas para satisfacer las necesidades de instituciones y empresas concretas...en los casos cuando se caracterizan las posibilidades potenciales generales de explotación de las aguas subterráneas ...y dichas aguas se consideran como parte de los recursos hidráulicos generales, es preferible el término de recursos de explotación”*.

La relación de balance siguiente enlaza las reservas de explotación (Q_{exp}) de las aguas subterráneas y resulta un modelo conceptual adecuado para el planeamiento del aprovechamiento de los recursos hidráulicos subterráneos en virtud de su relación con otros tipos de reservas y recursos:

$$Q_{exp} = \alpha_1 Q_{nat} + \alpha_2 \frac{Q_{grav}}{t} + \alpha_3 Q_{artif} + \alpha_4 \frac{Q_{inc}}{t} + Q_{atrab}$$

Donde, Q_{exp}, son las reservas(= recursos) de explotación; α₁, α₂, α₃, α₄, son los coeficientes de utilización de los distintos tipos de reservas/recursos; t, el periodo de explotación considerado; Q_{nat} son los **recursos naturales**; esto es, la suma de todos los elementos que conforman la alimentación natural de un acuífero determinado (infiltración de las precipitaciones atmosféricas, infiltración de las aguas superficiales de ríos y lagos, desbordamiento de horizontes acuíferos aledaños al de análisis).

¹ En 1973, la Primera Reunión de Normas y Metodologías para los Estudios Hidrogeológicos en Cuba, patrocinada por el Grupo Hidráulico Nacional del Ministerio de Desarrollo Agropecuario del País (DAP), al crear la Comisión Nacional con ese propósito, desarrolló el primer intento de institucionalizar y normar el uso de los conceptos y los métodos de cálculo. Casi todas las normativas cubanas para estudios hidrogeológicos se han producido bajo esa influencia.

² En realidad, del acuífero (Nota del Autor)

Tabla 1. Distintas clasificaciones de reservas y recursos (De Miguel, 1999, con añadido de los autores). El concepto original que separa las reservas de los recursos se debe a Savariensky (1934) y no implica que, comparando los restantes autores entre sí, los conceptos correlacionan. La clasificación de cada autor debe observarse individualmente en la propia columna dentro del grupo identificado por Savariensky (1934) y no con otro autor.

P. P. Savariensky, 1934	L. P. Butov	B. J. Kudelin	N.A, Plotnikov, 1962,1968 E.F. Famm K.I. Makov	M-E. Altovsky F.M. Bochever M.P. Simeonov Bochever, 1968	N.N. Bindeman	CAME, 1985 Bindeman y Yazvin, 1976	L. Mijailov, 1989 N.N. Bindeman,	P. P. Kliméntov V.M. Kónonov, 1982	H. Schoeller, 1962	G. Kóvacs et al. 1972	D. Pérez Franco, 1995
Reservas	Pasivas	Geológicas	Seculares		Naturales	Naturales: Gravitacionales Elásticas Artificiales	Naturales (incluye las reservas elásticas de los horizontes artesianos) Artificiales	Naturales Artificiales De explotación	Reservas	Recursos (reservas) Estáticas	Reserva permanente Reserva media total
Recursos			Dinámicas naturales	Escurrencimiento subterráneo Escurrencimiento subterráneo a los ríos	Reservas y recursos naturales Reservas dinámicas Atraíbles Reservas = Recursos de explotación = Recursos explotables	Naturales Artificiales Atraíbles	Recursos naturales Recursos artificiales Recursos incorporables o atraíbles Recursos /reservas de explotación: -Balanceadas -Fuera de Balance	Naturales Artificiales Incorporados	Recursos naturales	Recursos (Reservas) dinámicos	Recursos disponibles Recursos explotables (=rendimiento seguro/safe yield)

Estos recursos pueden ser determinados por la magnitud del gasto (caudal) del flujo de las aguas subterráneas, o por la suma de los gastos de los distintos componentes; V_{nat}, son las reservas naturales; es decir, el volumen de agua gravitacional que se encuentra en los poros, grietas y cavidades cársticas de las rocas acuíferas en condiciones naturales. En los **horizontes freáticos** (sin presión), de forma independiente se define el volumen de agua gravitacional en la zona de oscilación de los niveles, denominándose este volumen **reserva reguladora**.

En los horizontes acuíferos artesianos (con presión), el volumen que puede ser extraído del estrato con el descenso de las presiones debido a las propiedades elásticas del agua y de las rocas se denomina **reserva elástica**; recursos artificiales; Q_{artif}, es el gasto de agua que entra al horizonte acuífero como resultado de medidas con fines objetivos o por la ejecución de construcciones hidrotécnicas y de mejoramiento, no previstas para la reposición de las aguas subterráneas; V_{artif}, son las reservas artificiales y que consideran el volumen de agua subterránea gravitacional que se encuentra en el estrato acuífero, formado como consecuencia de la acción de medidas ingenieras ejecutadas con el fin de reposición artificial de las aguas subterráneas; Q_{inc}, recursos incorporables o atraíbles, que incluyen aquellos caudales que ingresan al horizonte acuífero como consecuencia del incremento debido a la captura de aguas subterráneas de otros horizontes o sistemas acuíferos como consecuencia de la explotación de las aguas subterráneas.

De Miguel (1999) incluye dos tipos de reservas de explotación atendiendo a su significado económico que, por su naturaleza, están subordinadas a cálculos, confirmación y controles independientes; a saber: las **reservas balanceadas**, aquellas cuya utilización es económicamente racional, y deben satisfacer las exigencias de calidad para objetivo específicos y con un régimen de explotación determinado y las **reservas fuera de balance o no balanceadas**, con las que se designan aquellos volúmenes o caudales cuya extracción en el momento actual no resulta económicamente factible, sea por la baja productividad del horizonte acuífero, la calidad de las aguas, limitaciones tecnológicas, tecnologías complejas o restricciones geológicas pero que pueden ser consideradas en perspectiva de uso en el futuro.

Pérez Franco (1995) define conceptos más pragmáticos. La **reserva** es “la cantidad de agua almacenada en el acuífero que puede drenar por la acción de la gravedad...se expresan en unidades de volumen y equivalen al producto del volumen de la estructura del acuífero y su porosidad efectiva”. Los **recursos** representan “el volumen de agua disponible para la explotación. Se expresan en unidades de caudal (volumen por unidad de tiempo...dependen directamente de la alimentación del acuífero por medios naturales o artificiales”. El concepto de reserva es estático y el de recurso es un concepto dinámico, añade.

Bajo ese modelo conceptual, define los siguientes tipos de reservas y recursos:

Reserva permanente (W_p), equivalente a la reserva mínima media, Siendo la reserva mínima aquella limitada por la superficie freática máxima, que se corresponde con el caudal mínimo o de estiaje del escurrimiento subterráneo

Reserva total (W_t) la reserva máxima media, definida la reserva máxima como aquella limitada por la que se corresponde con el caudal máximo del escurrimiento subterráneo

Variación de reserva (dw , la diferencia $W_t - W_p$). Esto equivale al concepto de reservas reguladoras.

Recursos disponibles (Q_d) que dependen fundamentalmente de la alimentación neta del acuífero y representan el volumen total de agua, expresado en forma de caudal que se podría extraer permanentemente a largo plazo del acuífero, sin que experimente una reducción en la reserva permanente. **En el caso de acuíferos libres, resultan equivalentes a la variación media de la reserva: son estos los recursos que alimentan el caudal base y el caudal de agotamiento de surgencias y cursos de agua que, en condiciones de equilibrio, corresponden al caudal del escurrimiento subterráneo.**

Recursos explotables (Q_e), equivalentes al rendimiento seguro (safe yield) de los autores anglosajones, que representan el volumen de agua, expresado en forma de caudal que se puede captar de un acuífero a largo plazo, sin originar alteraciones indeseables en el régimen de las aguas subterráneas, teniendo en cuenta condiciones técnicas y económicas

En ninguna de las definiciones anteriores se incluye el tiempo de residencia de las aguas, como indicador de la renovación natural (o artificial) de las reservas ni de los procesos que rigen la adquisición de su composición química y del balance hídrico. Sin embargo, procesos como la sobreexplotación o minado del acuífero están en algunos casos, vinculados con una renovación lenta o en la extracción de aguas con tiempos de tránsito muy elevados (Molerio, 2006b, 2007).

CATEGORÍA DE ESTUDIO

Las Categorías de Estudio son un indicador de la precisión en el cálculo de las reservas de agua subterránea y combina también el grado de estudio de la calidad del agua y las condiciones de explotación. Se trata de cuatro categorías de estudio: A, B, C₁ y C₂ (Tabla 2).

De Miguel (1999) además, incluye la **Categoría P: Reservas pronóstico**, que consideran la posibilidad de encontrar nuevos yacimientos de aguas subterráneas, la suposición de existencia y dimensiones, en las cuales se basan las características hidrogeológicas generales y de complejos trabajos regionales ejecutadas con anterioridad. Durante la evaluación cuantitativa de las reservas pronóstico de los supuestos yacimientos de aguas subterráneas se utilizan datos de la experiencia de explotación de las aguas subterráneas en los horizontes acuíferos análogos en yacimientos investigados en la misma cuenca, macizo hidrogeológico o región. Los recursos pronóstico de explotación, determinados en procesos de evaluación regional, pueden ser divididos en dos tipos: **recursos potenciales de explotación** y **recursos prospectivos de explotación**.

Tabla 2. Categorías de Estudio de las Reservas de Agua Subterránea (Mijailov, 1989)

Categoría	Contenido
A	Reservas exploradas y estudiadas con una precisión que garantiza la completa aclaración de las condiciones de yacimiento, estructura y presión de los horizontes acuíferos, y también las propiedades de filtración de las rocas acuíferas, el esclarecimiento de las condiciones de alimentación de los horizontes acuíferos y de la posible recuperación de las reservas de explotación así como el establecimiento de la relación entre las aguas subterráneas sujetas a evaluación, las aguas de otros horizontes acuíferos y las aguas superficiales. La calidad de las aguas subterráneas se ha estudiado con una certeza que asegura su posible uso para los fines establecidos y conforme a los plazos calculados de consumo de agua.
B	Reservas exploradas y estudiadas con una precisión que asegura la aclaración de las principales particularidades de las condiciones de yacimiento, estructuración y alimentación de los horizontes acuíferos así como el establecimiento de la relación entre las aguas subterráneas cuyas reservas se calculan, las aguas de otros horizontes acuíferos y las aguas superficiales, y también la determinación de la cantidad aproximada de recursos hidráulicos naturales como fuentes de recuperación de las reservas de explotación de aguas subterráneas. La calidad de éstas se ha estudiado hasta tal punto que permite establecer su posible aprovechamiento para los fines programados.
C ₁	Reservas exploradas y estudiadas con una precisión que garantiza la aclaración en rasgos generales, de la estructura y las condiciones de yacimiento y difusión de los horizontes acuíferos. La calidad de las aguas subterráneas ha sido estudiada hasta tal punto que asegura la previa solución del problema acerca de su posible utilización para los fines programados.
C ₂	Reservas establecidas a base de datos geólogo-hidrogeológicos generales, confirmados por el muestreo del horizonte acuífero en puntos aislados, o bien por analogía con las áreas exploradas. La calidad de las aguas subterráneas se ha establecido a partir de muestras obtenidas en puntos aislados del horizonte acuífero o bien por analogía con los sectores estudiados de ese mismo horizonte. Las reservas de explotación de aguas subterráneas han sido determinadas dentro de los límites de estructuras y complejos acuíferos favorables.

Los **recursos potenciales de explotación** son la cantidad de agua que puede ser obtenida con la ubicación de tomas de agua en toda el área de desarrollo del horizonte acuífero, y con distancia entre las tomas de agua que garanticen la utilización total de las reservas y recursos naturales, artificiales y atraíbles con un abatimiento del nivel dado y durante un período de explotación asumido. De tal forma los recursos potenciales de explotación caracterizan la cantidad máxima de agua que puede ser extraída del horizonte acuífero.

Los **recursos prospectivos de explotación** a diferencia de los potenciales corresponden a un esquema determinado de ubicación de las tomas de agua y de sus gastos. Los recursos prospectivos de explotación son evaluados considerando las necesidades de usuarios concretos, en la mayoría de los casos **son menores** que los potenciales, en dependencia del sistema de ubicación de las tomas de agua y de las condiciones hidrogeológicas. Los recursos prospectivos de explotación pueden representar desde un 10% hasta un 100% de los potenciales.

De Miguel señala que la evaluación final de las reservas de explotación (por categorías industriales A, B, C) se ejecuta para condiciones hidrogeológicas concretas y para un proyecto de tomas de agua concreto.

MÉTODOS DE CÁLCULO DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

La Tabla 3 resume los métodos tradicionales más importantes para la determinación de los recursos de agua subterránea. Los comentarios se incluyen en la propia tabla.

TRATAMIENTO DE LA INCERTIDUMBRE EN ACUÍFEROS CÁRSICOS

Manejar la incertidumbre y la variabilidad de la data requiere definir lo que representan en el contexto que se trata y cómo se mide: así, la incertidumbre se refiere al grado de confianza (o duda) que se tiene de la exactitud o precisión de la data. **La incertidumbre es una estimación cuantitativa de los errores presentes en la data**; de hecho, hay dos (algunos autores incluyen tres; incluso cuatro) tipos de incertidumbre: **epistémica** (reducible o sistemática y **aleatoria** (irreducible o estadística). Una tercera sería la **ontológica** (derivada de procesos impredecibles; tal vez incluyendo en ellos aquellos de rara aparición –pero altamente catastróficos-). Ciertos autores la separan en **aleatoria, estocástica, epistémica** y

ontológica. En cualquier caso, es una medida de desconocimiento y de (in)seguridad de la información generada cuya magnitud afecta sustancialmente la gestión eficiente de la sociedad y sus recursos.

Tabla 3. Fuentes de incertidumbre de los métodos de cálculo de los recursos de aguas subterráneas

Método (Mijailov, 1989; Pérez Franco, 1995; Todd, 1973; Todd y Mays, 2005; Cap-Net, 2010; Mijares et al., 2006)	Síntesis	Principales fuentes de incertidumbre
Hidráulico	Parte del pronóstico de abatimiento para un cierto caudal en las obras bajo condiciones de régimen permanente lineal	Representatividad de la estructura del acuífero según la distribución de los pozos; precisión de los abatimientos; presunción de régimen permanente (equilibrio) lo que significa que los abatimientos serán inferiores a los reales; estructura, forma y dimensiones del acuífero; no considera los periodos de alimentación del acuífero
Hidrodinámico	Se basa en la utilización directa de las ecuaciones con las que se calcularon los rendimientos de las obras de toma, básicamente de los modelos analíticos de flujo no permanente lineal hacia pozos y galerías	Precisión y representatividad de los ensayos de caudal; identificación de las desviaciones de las condiciones de borde teóricas de cada modelo analítico empleado; el método de regionalización de las variables;
Hidroquímicos e isotópicos	Destinados principalmente a esclarecer las fuentes de alimentación y el origen de las aguas y se basa en la correcta identificación de elementos traza	Representatividad de los puntos de muestreo de las aguas de entrada; longitud de las series; adecuada identificación de los elementos traza; conocimiento de los procesos internos de disolución, deposición, redisolución en el sistema; variabilidad espacial y temporal de los eventos de precipitación y escurrimiento; variación horizontal de los perfiles del suelo y de las condiciones hidrogeológicas
Balace hídrico	La determinación de recursos hídricos subterráneos parte de despejar la componente de infiltración (I) en la ecuación general de balance $Q = P + E + \Delta S$ (ésta última la variación de reservas para balances anuales)	La precisión en la medición de la lluvia (LL), la representatividad de los pluviómetros, la longitud de la serie, el periodo escogido; los métodos de determinación de la Evaporación y evapotranspiración (E) y su transposición a valores regionales; el área de la cuenca
Control de explotación	Inventario y registro sistemático de los caudales de explotación de las obras y su reflejo en el régimen y la calidad e las aguas subterráneas	La precisión de los reportes; la periodicidad de colecta de datos; la conjunción con el control hidrogeológico de niveles, caudales y calidad de las aguas
Rendimiento seguro	Es un término que ha caído en desuso porque una fuente permanente de agua que dependa exclusivamente de los aportes y de una configuración específica de las obras de toma no tiene sentido hidrológico	La adecuada longitud de las series hidrometeorológicas, su distribución inter e hiperanual y, su variabilidad y representatividad temporal y espacial; distribución y régimen de las obras de captación; variación y variabilidad de la calidad del agua; derechos sobre las fuentes de agua
Rendimiento sostenible	Se ha tomado como análogo al anterior	ídem
Recesión/Agotamiento	Descompone el caudal base en cada una de las componentes principales del universo cársico y es el método más seguro para caracterizar la hidrodinámica natural del karst y permite la obtención de las reservas reguladoras	Área de la cuenca/sistema de flujo drenado; conocimiento del sistema cársico y de la distribución de sus espacios fundamentales y el grado de participación de cada uno en el balance total de las aguas; precisión de la hidrometría; precisión de la alimentación del acuífero; conocimiento de las líneas de drenaje fundamentales

Método (Mijailov, 1989; Pérez Franco, 1995; Todd, 1973; Todd y Mays, 2005; Cap-Net, 2010; Mijares et al., 2006)	Síntesis	Principales fuentes de incertidumbre
Cambios de carga hidráulica	Diferencias del nivel de las aguas subterráneas en dos periodos consecutivos de niveles máximos y mínimos	Válido solamente en acuíferos libres; conocimiento de la estructura del acuífero y posición del muro impermeable de la base; representatividad de los puntos de observación del nivel; precisión en el cálculo de la porosidad efectiva del acuífero
Caudal de escurrimiento subterráneo	Calcula el caudal a través de una sección transversal del acuífero ortogonal a las líneas de flujo	La combinación de caudales naturales y de explotación; asume que toda el agua de la zona de recarga a la de descarga pasa por la sección; precisión y representatividad de la determinación de la conductividad hidráulica (K), el gradiente hidráulico (I), el exponente de flujo (n); la precisión en el trazado de las hidroisohipsas
Infiltración efectiva o eficaz	Se basa en la medición directa o indirecta de la recarga natural de acuífero	Representatividad de los puntos de monitoreo; precisión de las mediciones; estructura del acuífero; identificación de las relaciones entre las mediciones de lluvia y la recarga (o descarga) en cada punto
Caudal de la zona de drenaje del acuífero	Diferenciación de los aportes subterráneos mediante hidrógrafo o mediciones directas	Identificación de la forma, límites y estructura del acuífero vertiente; precisión en las mediciones hidrométricas; representatividad del periodo de medición
Analogías	Método elemental que establece parámetros por semejanza entre sistemas acuíferos	Calidad del conocimiento del acuífero de referencias; restricciones impuestas al modelo análogo; representatividad de los patrones de semejanza
Modelos matemáticos de simulación	Se reconocen modelos: analógicos, analíticos, numéricos, físicos y estocásticos	Analógicos: Identificación de modelos con categorías físicas diferentes, representativos del problema a investigar Analíticos: Homogeneidad del acuífero; representatividad y efectividad de la promediación de las propiedades base Numéricos: representatividad de los valores de entrada, representatividad de la malla del modelo; representatividad del periodo de modelación Físicos: No son efectivos para medios cársicos o fisurados no cársicos Estocásticos: Representatividad temporoespacial de la serie de datos de entrada
Rendimiento de las obras de captación	Establece la correspondencia entre el tipo y disposición de las obras de captación y los volúmenes de explotación en ciclos cerrados de explotación	Precisión en las mediciones de caudal; representatividad de la distribución geográfica de los sistemas de explotación; tipo de obras y construcción; condiciones límite de explotación (gasto permisible)

Aunque en Cuba no es común incorporar medida alguna de incertidumbre en la evaluación de los recursos de agua subterránea a cualquier escala, desde la obra de captación hasta los sistemas regionales (cuencas, que es el concepto dominante de unidad hidrogeológica en el país), el solo hecho de que la absoluta mayoría de las aguas subterráneas se encuentren en terrenos cársicos es suficiente para definir que se trabaja con un nivel de incertidumbre muy variado pudiendo presumirse que, en general, no es bajo. Y, en cualquier caso, las aguas subterráneas, excepto en ciertos espacios cársicos, son un recurso que se evalúa por métodos indirectos; yace oculta bajo la superficie y la información que se

obtiene de ellas está absolutamente sesgada por la exactitud/precisión del modo en que se adquiere y procesa la data de entrada.

En la Tabla 4, numerosos términos caracterizan las distintas fuentes de incertidumbre en la gestión de los recursos hídricos subterráneos. El análisis de la incertidumbre y el modo de tratarla ha sido considerado por numerosos autores en las últimas décadas (Altovsky y Konoplyantsev, 1959; Klimentov y Kononov, 1989; Yazvin 1972; Borevskii, Samsonov y Yazvin, 1979; Piñera, Molerio y March, 1982; TNO, 1983; Wayland y Valocchi, 1986; Quinodoz, 1996; Krishnamurthy, 2014; Refsgaard, 2011; Guillaume et al., 2016; Kifanyi et al., 2017; Curto, 2020). Particularmente en el karst, son de interés las contribuciones de Jaquet et al. (2004); Caers, Par y Scheidt (2010); Gondwe, Merediz-Alonso y Bauer-Gottwein (2011); Fandel et al. (2021); Frantz et al. (2021); Zanini et al. (2021) y Banusch et al. (2022).

Las fuentes fundamentales de incertidumbre pueden agruparse en el esquema de la Fig. 3. En este punto, es importante recordar que la administración eficiente de los recursos hídricos incluye la gestión correcta del riesgo, donde la evaluación y tratamiento de la incertidumbre por métodos adecuados es garantía de la eficiente gerencia de las aguas. La Tabla 4 resume los contenidos más importantes.

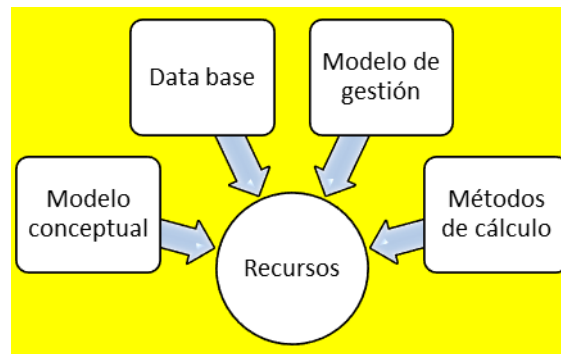


Fig. 4. Grupos básicos de fuentes de incertidumbre en la evaluación y desarrollo de los recursos de agua subterránea

Tabla 4. Contenido básico de las fuentes principales de incertidumbre en la gestión de los recursos hídricos subterráneos en el karst

Grupo de fuente de incertidumbre	Contenido básico
Modelo conceptual	Hidrológicos e hidrogeológicos Hidráulicos e hidrodinámicos
Data base	Diseño de las redes (cantidad de puntos de medición, distribución espacial, contenido, frecuencia) Métodos de adquisición, almacenamiento, procesamiento, recuperación y generalización Precisión y exactitud de las mediciones
Métodos de cálculo	Véase Tabla 3
Modelo de gestión	Marco institucional de la administración del recurso (con énfasis en el control de explotación) Ambigüedades o imprecisiones del soporte jurídico y normativo

En una nota reciente (Molerio, 2024) adelantábamos algunos conceptos que debían ser revisados para mejorar la gestión de las aguas terrestres en el karst, y no solamente en Cuba. Es necesario tener siempre presente que la gestión de las aguas terrestres en regiones cársicas es sumamente compleja por razón del propio modelo físico del karst.

Este puede sintetizarse de este modo (Molerio, 1985a):

- Se trata de un sistema termodinámico abierto, es decir, en interacción con el medio exterior
- Las variables del campo de propiedades físicas exhiben anisotropía tridimensional progresiva
- El espacio que constituye el medio acuífero se presenta rigurosamente jerarquizado
- Cada espacio presenta un dominio de flujo particular y entre ellos se manifiesta intercambio de masa y energía
- Consecuentemente, el campo de propiedades físicas se define y estructura para cada espacio
- Se manifiesta una fuerte influencia del factor de escala sobre el campo de propiedades físicas (Fig. 5)
- En el sistema, el trabajo se manifiesta mediante la formación y desarrollo de estructuras autorreguladas de disipación de energía que, mediante retroalimentación, afectan el proceso
- Un momento de inercia, función del estado inicial del sistema, que modula jerárquicamente las respuestas a los estímulos inducidos natural o artificialmente
- La elevada dependencia del tiempo de las propiedades que caracterizan el campo de propiedades físicas (Molerio, 1984b)
- La irreversibilidad del proceso de carsificación y su evolución unidireccional

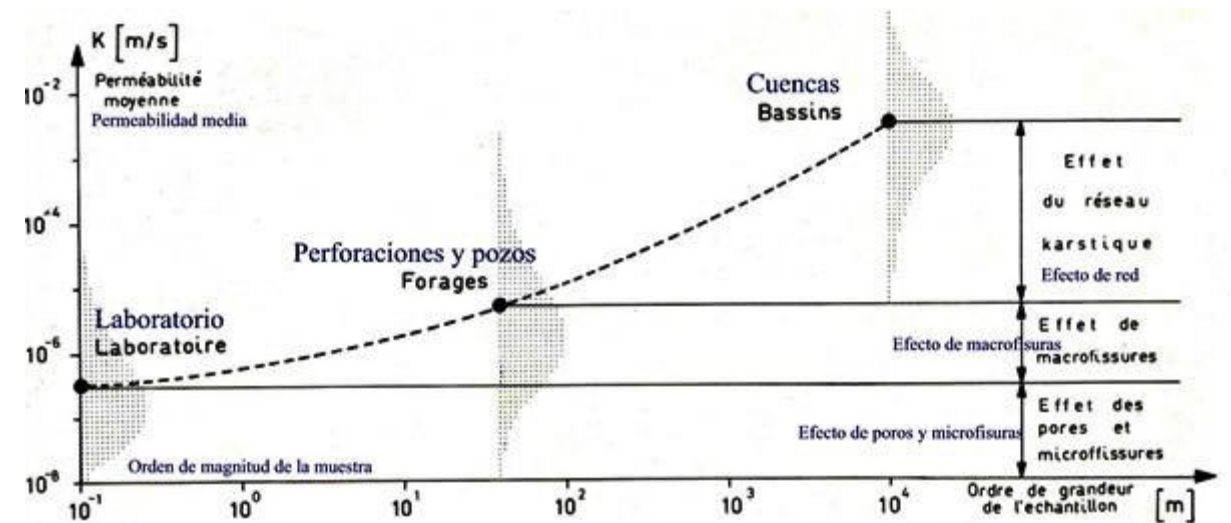


Fig. Curva de efecto del factor de escala (Király, 1975) que representa el modo en que la escala de los ensayos para la determinación de la estructura del campo de propiedades físicas es afectada por la magnitud de la muestra y, del mismo modo, la proporción la longitud, área o volumen representativo que es involucrado en la caracterización de esas propiedades (Molerio, 1984a).

De ahí se derivan conceptos geológicos, hidrológicos, hidráulicos y estadísticos o de formalización matemática de procesos que deben ser revisados e incorporados al proceso de gestión del recurso. Algunas ideas sobre estos temas fueron adelantadas recientemente (Molerio, 2024).

Características morfológicas e hidrológicas que hacen de los relieves cársicos un entorno singular, son las siguientes:

- Ausencia de valles verdaderos, los que están sustituidos por otras formas negativas de relieve, que reciben nombres particulares: dolinas, poljes, uvalas, entre otros.
- Red de drenaje superficial que, aunque de variables dimensiones, por lo general está mal desarrollada, distorsionada a trechos y donde la mayor parte de los ríos tienen cursos parcial o totalmente subterráneos.
- Red de drenaje subterránea de compleja configuración, regida por leyes hidrodinámicas particulares, o con acuíferos muy típicos, en ocasiones extensos y profundos, pero otras veces discontinuos, con singulares condiciones de alimentación, movimiento y descarga.
- Sedimentos autóctonos de cobertura muy permeables, de variable potencia y, en ocasiones, inexistentes, aflorando la roca desnuda.

- Desarrollo subterráneo de una amplia red de canales y conductos intercomunicados, con longitudes desde pocos centímetros hasta centenares de kilómetros (Fig. 5)
- Los avances teóricos de la hidrodinámica del karst y su implementación ingeniera han sido notables desde la segunda mitad del siglo XX, sobre todo luego de un notable impulso en las décadas del 70 al 90 del siglo pasado. Se hace imprescindible reducir la distancia que separa conocimiento teórico hidrológico, hidrogeológico, hidráulico y su instrumentación en la práctica cotidiana que alcanzan hasta el modo en que se obtiene, procesa y se interpreta la data base del régimen de las aguas subterráneas y superficiales. En apretada síntesis esos conceptos muestran a continuación.

PROBLEMAS HIDROLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS

1. En el karst, más que en ningún otro sistema hidrológico, las aguas superficiales y subterráneas constituyen un solo y único recurso.
2. El concepto de cuenca debe ser sustituido por el de sistema acuífero. Los límites de las aguas subterráneas cársicas no siguen necesariamente los de una cuenca superficial, pueden incluir más de una o puede no existir ninguna cuenca o relación con otra cuenca. Las amplias zonas interfluviales cársicas de Cuba son un buen ejemplo
3. Cuencas sedimentarias, en el sentido geológico, se reconocen en algunos sitios y están asociadas a formas del relieve con el que guardan una estrecha relación hidrológica, como la cadena de poljes Ariguanabo-Vento-Jaruco-Aguacate, o en Jibacoa y también en las llamadas cuencas Sur de Pinar del Río, La Habana y Matanzas
4. Pero estas cuencas tampoco son estructuras únicas, sino que están integradas por diferentes pequeñas cuencas geológicas, de espesor y composición litológica y modificaciones tectónicas variables, con notables cambios faciales verticales y horizontales, que explican la heterogeneidad de los acuíferos y también su anisotropía
5. Esta estructura sedimentaria diferenciada puede provocar que a la escala de sistema local de flujo los que formaban una unidad bajo ciertas condiciones hidrológicas e hidráulicas, se individualicen y se expresen en comportamientos diferenciados del régimen por lo que los pozos de referencia no pueden seguir asociándose ni aplicándose para el pronóstico de sus reservas, como es el caso de las singulares relaciones hidrodinámicas que se reconocen en las importantes cuencas Ariguanabo y Vento y en sectores internos como las zonas de Aguada del Cura o Meireles
6. Los aportes diferenciados del epikarst y de flujo hipodérmicos en la zona no saturada no suelen ser considerados en los balances o incluido como en el conjunto de aportes/pérdidas asociados a la ocurrencia de flujo hipodérmicos, comunes en el karst cubano

PROBLEMAS HIDRÁULICOS E HIDRODINÁMICOS

1. La dependencia del tiempo de las variables que estructuran el campo de propiedades físicas no es tomada en cuenta. Por razón de la variabilidad en que tiene lugar la recarga natural y otros estímulos naturales de pérdidas y aportes, la carga hidráulica depende del tiempo y, por ello, también dependen del tiempo y son variables temporales y espaciales, la estructura de las redes de flujo subterráneo, los gradientes hidráulicos y las relaciones de efluencia e influencia entre la red fluvial y el acuífero
2. Los campos de transmisividad y almacenamiento son también, por ese motivo, variables que dependen del tiempo
3. En consecuencia, los recursos disponibles también varían con el tiempo, por lo que tomar una referencia estricta de un cierto volumen de reservas o recursos (según el criterio que se adopte) es sumamente arriesgado y puede ser sólo una aproximación a una medida central durante cierto período de tiempo y que debe ser revisado sistemáticamente. Es evidente que, bajo las exigentes premisas de los diferentes escenarios de cambio climático el concepto de recursos como un volumen fijo debe reexaminarse cuidadosamente



Fig. 5. Los sistemas de galerías subterráneas intercomunicadas son indicadores de los patrones de anisotropía de los acuíferos cársicos que no suelen tomarse en consideración al elaborar e interpretar las redes de flujo de las aguas subterráneas (Foto Vladimir Otero).

4. La absoluta mayoría de las aguas subterráneas cubanas se organizan en flujos gravitacionales; sin presión, lo que, además de modificar la validez de la mayor parte de las ecuaciones que describen el flujo hacia obras de toma, resaltan la relación directa entre las variables naturales de aporte (lluvia y escorrentía) y pérdidas (evaporación y evapotranspiración) en el balance hídrico local, zonal y regional. No necesariamente, dentro de los límites fijados por la práctica o la hidrología tradicional, los sistemas de flujo pueden no seguir una disposición jerárquica
5. En las llanuras cársicas cubanas, el nivel de las aguas subterráneas no forma una superficie continua, sino que está separada por rocas o estructuras geológicas de menor permeabilidad, lo que limita el valor de uso de los mapas de hidroisohipsas. Cuando estos son empleados, la anisotropía del sistema agua roca debe medirse (Fig. 5), corregir las orientaciones en virtud del principio de que la conductividad hidráulica (K) es un tensor simétrico de segundo orden que caracteriza al medio y al fluido y, por tanto, existe una dirección de la velocidad en el sentido de K y otra en la del gradiente hidráulico (I). En montañas dominan los flujos concentrados, claramente individualizados, pero lejos de formar superficies real o virtualmente continuas excepto en los sedimentos granulares que rellenan los fondos de los valles, dolinas y poljes o los depósitos aluviales de los ríos que las discurren
6. El descenso de los niveles y caudales en el karst sigue una ley exponencial decreciente rigurosamente jerarquizada en los tres espacios que conforman la zona saturada del sistema acuífero: cavernas, grietas y poros (en el entorno de una matriz de no flujo, que constituye el nivel de base y el límite de la descarga y el flujo como muro de no flujo inferior). Cada espacio del universo cársico está caracterizado hidrodinámicamente por una medida de longitud característica, un tiempo de agotamiento y un rango de valores de los coeficientes que lo caracterizan, que no es tomado en cuenta en la identificación de los límites de los sistemas de flujo, su relación mutua, la generalización y, por ende, en la promediación espacial de sus valores (Tabla 5). Esa promediación espacial no suele llevarse a cabo bajo principios de regionalización geoestadística o geomatemática. A escala regional y/o en momentos de aguas bajas o con estrés deficitario en el acuífero, obviar estas consideraciones puede conducir a interpretaciones erróneas
7. En cualquier momento y en cualquier lugar del acuífero las aguas que se extraen mediante captaciones representan una mezcla de aguas con diferente tiempo de residencia en el sistema ya que se mueven siguiendo patrones curvos desde la zona de recarga hasta la de descarga (natural o artificial)

8. Generalmente existe una estratificación de tiempos de residencia asociada a un comportamiento estacional, por lo que el dominio de aguas con mayor tiempo de residencia (sobre todo en los puntos de descarga natural) puede provocar una recuperación lenta o un "enterramiento" del nivel piezométrico que conduzcan al agotamiento del recurso. En este caso y durante sequías prolongadas, la extracción de aguas cada vez más antiguas provoca el minado del acuífero, las aguas dejan de ser un recurso renovable y nuevas recargas no provocan recuperaciones efectivas de los recursos
9. Los recursos calculados en base a métodos hidráulicos e hidrodinámicos se basan en la errónea simplificación del medio acuífero real, heterogéneo y anisotrópico, a un medio ideal, continuo, isotrópico y homogéneo, de tal modo que los ensayos de caudal (aforos) en los que se basan no suelen tener la duración necesaria (generalmente son cortos) o el caudal suficiente (o ambos) para lograr estímulos adecuados del sistema acuífero; se caracterizan por la mayoritaria ausencia de pozos satélites en el área de influencia (mucho menos colocados en la dirección de la anisotropía), y se calculan en base a presunciones clásicas para acuíferos en medios porosos
10. Los procesos de transporte de masa, momento y energía en el karst responden a procesos no lineales, en los que el principio de superposición no es válido, por lo que los métodos de exploración y adquisición de datos físicos tienen que ser acompañados por el conocimiento de la hidrodinámica geoquímica e isotópica del sistema. Tanto para la protección de la calidad de las aguas terrestres subterráneas y superficiales como para la comprensión de los procesos de adquisición de la composición química de estas aguas.

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

ESPACIOS CONSTITUTIVOS DEL SISTEMA CÁRSICO

(según 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>

CATEGORÍAS	DENOMINACIÓN DEL ESPACIO	VOLUMEN CON RELACIÓN AL SISTEMA	LONGITUD CARACTERÍSTICA	RÉGIMEN DE FLUJO	DIÁMETRO
E S P A C I O N T I N U O	1. Cavernas	$v \leq 1\%$	km.	No lineal de alta velocidad	m
	2. Grietas y discontinuidades en general (macrofracturas):	$1\% \leq v \leq 5\%$	km.	No lineal de alta velocidad	mm - m
	- Fallas		km.	Lineal	m
	- Diaclasas.		km.	Lineal	mm-cm
	- Planos de estratificación.		km.	Lineal	cm
	- Planos de esquistosidad.	cm	Lineal	mm	
E S P A C I O D I S C O N T I N U O	3. Poros de la matriz rocosa (microfracturas):	$5\% < v \leq 40\%$	mm	No lineal de baja velocidad (microflujo)	$\leq 0,1$ mm
	- Exfoliación		mm		0,1 mm
	- Esquistosidad		mm		10 μ
	- Clivaje		mm		0,1 μ
	4. Matriz sólida	$v > 40\%$		No lineal de baja velocidad (no flujo)	< 1 mm

PROBLEMAS DEL PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA DATA

En el diseño y operación de las obras de aprovechamiento hidráulico el mayor sesgo viene definido por la extraordinaria deficiencia de que la hidrología estadística tiene implícita la presunción de que el clima es estable durante todo el tiempo de vida de las obras y, en consecuencia, la dinámica del cambio no suele ser considerada. Sorpresas previsible se producen en al aprovechamiento de las aguas terrestres precisamente debido a este principio. Las respuestas diferenciadas de los espacios del universo cársico n suelen ser tomadas en consideración o distinguidas adecuadamente.

Algunos de los problemas identificados son los siguientes:

1. La selección de pozos representativos de comportamiento del régimen del acuífero tiene que ser sometida a análisis estadísticos rigurosos de homogeneidad de la serie y representatividad del comportamiento de la región de flujo
2. Por lo común se toman mediciones (de niveles, composición química) en pozos alejados de condiciones supuestamente perturbadoras, como manantiales o pozos de extracción, lo que puede resultar engañoso pues no representan las condiciones hidrodinámicas reales que se pretende caracterizar y describir
3. La estimación de los recursos a partir de los niveles no puede basarse en el engañoso concepto del promedio aritmético de niveles, sino en la promediación temporo-espacial de la propiedad índice que se seleccione habida cuenta que las variables que gobiernan el campo de flujo siguen una distribución log normal y no normal
4. La reducción al continuo y sus limitaciones. La propia confección de redes de flujo y su interpretación están basadas en la presunción de que se trata con acuíferos homogéneos e isotropos, en la que el campo de flujo tiene una estructura vectorial y el campo de velocidad es proporcional a la conductividad eléctrica y al gradiente de flujo y no se asumen condiciones de borde rigurosas y se extienden, al medio ideal, las condiciones de un medio real muy diferente

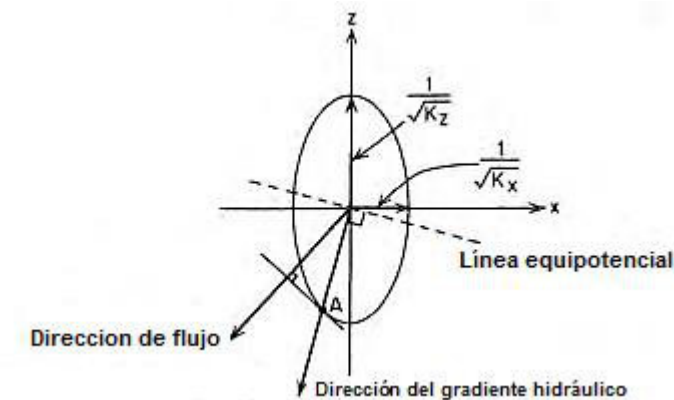


Fig. 6. Determinación de la dirección de flujo en un dominio anisotrópico con $K_x/K_z = 5$ (tomado de Freeze y Cherry, 1979)

NOTA FINAL

No son pocas ni despreciables las fuentes de incertidumbre en la evaluación de los recursos de aguas subterráneas en el karst. Aunque se ha tomado el ejemplo de Cuba, el mismo problema se repite en muchísimas regiones y países. El problema trasciende la gestión de las aguas subterráneas y tiene efectos notables en el diseño de cimentaciones ara obras civiles e hidrotécnicas, el balance de obras de regulación artificial, particularmente las pérdidas y daños a presas y embalses, el flujo de agua y la estabilidad de minas y túneles, la protección contra movimientos de ladera y el manejo de crecidas en zonas urbanas y suburbanas.

Se requiere una profunda revisión de las metodologías de cálculo que comienzan por considerar el karst como un objeto y no como un espacio y de ahí, toda la superestructura destinada al conocimiento y aprovechamiento del medio cársico: el diseño de las redes de monitoreo y el modo en que se capta, almacena, procesa, recupera y generaliza el dato base para generar información útil y confiable para la gestión del recurso. Bajo las aceleradamente cambiantes condiciones de

contorno físico, social y económico del problema del uso del agua en el mundo, la aplicación de técnicas propias de la hidrología del karst y la creación y mejoramiento de capacidades nacionales ha sido una tarea sistemáticamente postergada.

Los problemas antes mencionados no son todos los que sesgan el mejor conocimiento y aprovechamiento del recurso agua en el karst, hay algunos a escala local trascendente para pequeñas comunidades que tampoco deben postergarse en tanto estén bien identificados. El desarrollo teórico que hoy alcanza la hidrogeología del karst es, precisamente, la razón para no eludir la rectificación de conceptos y métodos caducos e inoperantes.

RECONOCIMIENTOS

En la continua búsqueda del mejoramiento del conocimiento de los recursos hidráulicos del karst cubano hemos compartido numerosos estudios y exploraciones con un grupo de compañeros y amigos a quienes agradecemos su agradable compañía y los muy provechosos intercambios de puntos de vista sobre estos temas. Especial gratitud a nuestros compañeros cubanos, soviéticos, búlgaros y checos de tantos años en el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos: Mario Guerra, Ernesto Flores, Roberto Varela, Ernesto Rocamora, José A. Díaz Machín, Cecilia March, Flor Jiménez, Arturo González, José R. Luege, José M. Ferrer, José Luis Batista, Manuel Núñez, Lorenzo Carvajal, Juan Bobes, Teresita Morales, Jaroslav Vrba, Aftandil Tzirekitze, Alexei Rudovol, Ilya Lumelski, Jesús Piñera Caso, Osvaldo Barros, Antonio Armesto, Eduardo Planos, Constantino de Miguel, Dionisio Amor, Pedro L. Dorticós y Andrés Díaz Arenas; del Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría”, a Diosdado Pérez Franco, Fernando Pérez Monteagudo, Haydee Llanusa, José B. Martínez y Armando Hernández; de la Universidad de Pinar del Río, Rebeca Hernández; de la Universidad de Sofía y el Instituto de Hidrometeorología de Bulgaria: Mijail Galabov, Peter Yankov y Svetanka Guneva; de UNESCO, John Gladwell (ex Oficial del Programa Hidrológico Internacional) y Carlos Fernández Jáuregui (ex Hidrólogo Regional, ROSTLAC); de la FAO, Guy Chapond y Robert G. Thomas. Muy especialmente a Lászlo Kiraly, de la Universidad de Neuchatel (suiza). Agradecimiento personal a nuestro amigo Alfred Antonetti, quien asumió la adquisición y envió a Cuba de importante literatura especializada.

REFERENCIAS

Altovsky, M.; A. Konoplyantsev (1959): **Manual for the systematic study of the regime of underground waters**. Foreign Lang. Publ House, Moscú, 282:

Banusch, S., M.Somogyvári, M. Sauter, P. Renard, I. Engelhardt, (2022): **Stochastic modeling approach to identify uncertainties of karst conduit networks in carbonate aquifers**. Water Resources Research, 58, e2021WR031710.

Batista Silva, J. L. (1973): **División del territorio en regiones hidrológicas (Parte I)**, Revista Voluntad Hidráulica No 28, INRH, ISSN: 0505-9461, pp. 14–26, LaHabana, Cuba.

Batista Silva, J. L. (1974): **División del territorio en regiones hidrológicas (Parte II)**, Revista Voluntad Hidráulica No 29, INRH, ISSN: 0505-9461, pp. 6–21, LaHabana, Cuba.

Batista Silva, J. L. (1984): **Regionalización hidrológica de Cuba**. Instituto de Geografía, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, 38 p

Batista Silva, José Luis (2016): **Evaluación de los recursos hídricos de Cuba**. Rev. Geográfica, enero-diciembre:73-83

Berri, I., K. Loskutov, A. Díaz, R. Varela (1975): **Principios Fundamentales del Esquema General del Aprovechamiento Complejo de los Recursos Hidráulicos y agrarios de la República de Cuba. Tomo 3: Condiciones Hidrogeológicas**. Grupo Hidráulico Nacional, D.A.P., La Habana, inédito, Archivo Inst. Nac. Rec. Hidráulicos, 292:+Anexos

Bindeman, N.N., L.S. Yazvin (1976): **Evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas**. Edit. Nedra, Moscú, (en ruso), 235:

Bobes Consuegra, Juan (1974): **División Esquemática de las Cuencas Hidrogeológicas, a escala 1:500 000**. Grupo Hidráulico Nacional, DAP.(inédito).

Bobes Consuegra, Juan y Leslie F. Molerio León (1973): **División Preliminar de las Cuencas Hidrogeológicas de Cuba**. Grupo Hidráulico Nacional, DAP. (inédito).

Bochever, F.M. (1968): **Métodos hidrogeológicos teóricos y prácticos para el cálculo de las reservas de agua subterránea**. Edit Nedra, Moscú, 325:

Borevskii, B.; B. Samsonov & L. Yazvin (1979): **Metódica para la Determinación de los Parámetros de los Acuíferos por Datos de Aforos**. Edit. Nedra, Moscú, 328: (en ruso)

Buttkus, Burkhard (2000): **Spectral analysis and filter theory in applied Geophysics**. Springer, 667:

Caers, J., K. Park, C. Scheidt (2010). **Modeling uncertainty of complex Earth systems in metric space**. In **Handbook of geomathematics, In Handbook of geomathematics** (pp. 865–889). Springer Berlin Heidelberg.

De Miguel Fernández, C. (1996): **Regionalización hidrogeológica de la provincia de Holguín**. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Holguín, 54:

CAP-NET (2010): **Gestión de las aguas subterráneas en la GIRH. Manual de Capacitación**. Banco Mundial, PNUD, Unión Europea, 125:

Curto Lorenzo, David (2020): **Herramientas y Técnicas en la Gestión de la Incertidumbre**. Tesis, Univ. Valladolid., 111:

De Miguel Fernández, Constantino (1999): **Hidrogeología Aplicada**. Editorial Félix Varela, La Habana, 453:

De Miguel Fernández, C. (2001): **Evaluación y zonificación de la factibilidad de salinización de suelos del Valle del Cauto provincias Holguín y Las Tunas por método hidrogeológico**. En: IV Congreso Cubano de Geología y Minería, Memorias Geomin 2001, La Habana, marzo 19-23.

De Miguel Fernández, Constantino (2012): **Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales**. Edit. Digital Universitaria Moa, Inst. Sup. Minero Metalúrgico, Cuba, 384:

De Miguel Fernández, C., y Y. Vázquez-Taset (2005): **Regionalización hidrogeológica de la provincia de Holguín, República de Cuba**. Minería y Geología, 21 (3).

Díaz Duque, José Antonio (2018): **El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad**. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XXXIX (2), May-Ago 2018:46-59

Dorticós del Río, Pedro Luís, Mercedes Arellano Acosta, Jorge Mario García Fernández, Margarita Fontova de los Reyes, Nercy Becerra Infante, Eulalia López Álvarez, Argelio Fernández Richelme, Enrique Martínez Ovide, Abel Fernández Díaz, Rubén Hernández Boy, Maria Isabel González González, Leyda Oquendo Barrios, Carmen Terry Berro, Rigoberto Lamysier Castellanos (2012): **Recursos hídricos en Cuba Una visión**. En/ Blanca Jiménez Cisneros José Galizia Tundisi: **Diagnóstico del agua en las Américas**. Red Interamericana de Academias de Ciencias Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, México:244-265

Egorov, S.V., 1967. **Aguas subterráneas de Cuba y algunos problemas de los métodos de su estudio**. Tecnológica 5 (3).

Egorov, S.V., I.N. Egorova, J.R. Luege (1965): **Mapa hidrogeológico de Cuba**. Instituto Cubano de Recursos Hidráulicos e Instituto Cubano de Recursos Minerales.

Fandel, C., T. Ferré, Chen, Z., Renard, P., & Goldscheider, N. (2021): **A model ensemble generator to explore structural uncertainty in karst systems with unmapped conduits**. *Hydrogeology Journal*, 29(1):229–248.

FAO (2015): **AQUASTAT Perfil de País - Cuba. Versión 2015**. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, Italia, 14:

Frantz, Y., P. Collon, P. Renard, S. V. iseur, (2021): **Analysis and stochastic simulation of geometrical properties of conduits in karstic networks**. *Geomorphology*, 377, 107480

Freeze, R. Allan, John A. Cherry (1979): **Groundwater**. Prentice Hall, NJ, 588:

Gondwe, Bibi R.N., Gonzalo Merediz-Alonso, Peter Bauer-Gottwein (2011): **The influence of conceptual model uncertainty on management decisions for a groundwater-dependent ecosystem in karst**. *Journal of Hydrology* 400 (2011) 24–40

González Piedra, Julio Iván, Hanne María Domínguez Pastrana (2019): **Distribución espacial de los recursos hídricos en Cuba**. *Proyección*. XIII:136 – 156

Guillaume, Joseph H.A., Randall J. Hunt, Alessandro Comunian, Rachel S. Blakers, Baihua Fu (2016): **Methods for Exploring Uncertainty in Groundwater Management Predictions**. In/ Anthony J. Jakeman, Olivier Barreteau, Randall J. Hunt, Jean-Daniel Rinaudo, Andrew Ross [Editors] **Integrated Groundwater Management. Concepts, Approaches and Challenges**, Springer Open: 711-737

INRH (1986): **Esquema regional precisado para la utilización de los recursos hídricos y de suelos de las provincias cubanas**. La Habana, 245:

INRH (2000): **Sistema de ubicación de cuencas subterráneas por provincias y complejos hidráulicos**. Dir. Protección de Cuencas y Calidad de las Aguas, La Habana, (inédito),23:

Jaquet, O., P. Siegel, G. Klubertanz, H. Benabderrhamane, (2004): **Stochastic discrete model of karstic networks**. *Advances in Water Resources*, 27(7):751–760

Kifanyi, Gisar E., Julius M. Ndambuki, Samuel N. Odai (2017): **A Quantitative Groundwater Resource Management under Uncertainty Using a Retrospective Optimization Framework**. *Sustainability* 9(2), 15:

Kiraly, L. (1975): **Rapport sur l'actuel des connaissances dans le domaine des caractéristiques physiques des roches karstiques**. In: Burger, A. & Dubertret, L. (eds): **Hydrogeology of Karstic Terrains**. International Association of Hydrogeologists, Paris, 53-67.

Kliméntov, P.P., V.M. Kononov (1989): **Metodología de las investigaciones hidrogeológicas**. Edit Mir, Moscú, 476:

Kóvacs, G., M. Edélyi, P. Major, K. Korim (1972): **Hydrological investigation of subsurface water. III. Hydrology of groundwater. Lecture 1**. Internatl. Post graduate Course on Hydrological methods for developing water resources management. VITUKI. Res. Inst. Water Resources Development, Budapest, 189:

Krishnamurthy, Chandra Kiran B (2014): **Optimal Management of Groundwater under Uncertainty: A Unified Approach**. CER, Center for Environmental and Resource Economics and Umeªa School of Economics and Business, 40:

Kuzmin, G.G., N.N. Lapshin, J.R. Luege (1968): **Elección de los parámetros hidrogeológicos para la estimación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas en la región de Victoria de las Tunas, provincia de Oriente, Cuba**. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Publicación Especial Número 6, La Habana.

Lapshin, N.N., A.Oskotski, M. Iturralde-Vinent (1968): **División en regiones hidrogeológicas de la zona Guane-Mantua, provincia de Pinar del Río**. Publicación Especial no. 5 del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, pág. 33-54.

Martashvili, G.Z., J.R. Luege y N.N. Lapshin (1967): **Métodos de trabajo en las zonas de balance hídrico durante las investigaciones hidrogeológicas en Cuba**. *Tecnológica*, 5 (6): 3-9

López-Infante, E.D., R. Santander Pozo y J.A. Estapé (2001): **Evaluación de las aguas subterráneas en los cayos del archipiélago cubano**. En: IV Congreso Cubano de Geología y Minería, Memorias Geomin 2001, La Habana, marzo 19-23.

López-Infante, E.D., y G. Solovey (1987): **Aplicación del método de balance de las aguas subterráneas de la parte occidental de la isla de Cuba**. *Voluntad Hidráulica*, 24 (73): 15-22.

Mijailov, L (1989): **Hidrogeología**. Edit. Mir, Moscú, 286:

Mijares, Javier Aparicio, Jaqueline Lafragua Contreras, Alfonso Gutiérrez López, Roberto Mejía Zermeño, Ernesto Aguilar Garduño (2006): **Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas**. PHI-LAC. PHI-VI, doc. Téc. 4, Inst Mexicano de Tecnología del agua, Montevideo, 95:

Molerio León, Leslie F. (1975): **Aplicación del Método de Recesión al Estudio Hidrodinámico de las Fuentes del río Mayabeque**. *Simp. XXXV Aniv. Soc. Espel. Cuba*, La Habana, :67 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, :143

Molerio León, Leslie F. (1982): **Algunos Resultados de la Aplicación del Método de Recesión al Estudio Hidrodinámico de los Acuíferos Cársicos cubanos**. *Coloquio Internac. Hidrol. Cársica de la Región del Caribe*, UNESCO, La Habana:189-212

Molerio León, Leslie F. (1984a): **El Efecto del Factor de Escala en la Interpretación del Campo Físico de las rocas carsificadas**. *Resumen. XXVII Internatl. Geol. Congr.*, Abril 4-14, 1984, Moscú, Vol VII, Secc. 16,:468-469. Véase, *Voluntad Hidráulica* 75:19-26

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

Molerio León, Leslie F. (1985a): **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. (1985b): **El Área Elemental Representativa (AER) para la Evaluación de las Propiedades Físicas del Carso. Modelo Teórico**. *Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba*, La Habana :45; 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, :323

Molerio León, Leslie F. (1989a): **Hidrogeología y Recursos Explotables del Campo de Pozos del Acueducto "El Gato", Habana**. *Jor. Cient. Resultado '89, Acad. Cienc. Cuba*, La Habana:20

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

Molerio León, L.F. (2006a): **Evaluación, aprovechamiento y protección de las aguas subterráneas en la Sierra del Rosario**. Mapping, Revista Internac. Ciencias de la Tierra (108), Madrid, Marzo: 6-12.

Molerio León, L.F. (2006b): **Isotopic evidence of the overexploitation of karst aquifers**. In/ Demuth, S., A. Gustard, E. Planos, F. Scatena, E. Servat (Eds.) (2006): **Climate Variability and Change: Hydrological Impacts**. IAHS Publ. 308, Publ. 308: 629-634 Wallingford.

Molerio León, L.F. (2007): **Tritium as an indicator of groundwater overexploitation in a tropical karst aquifer**. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in sustainable Water Resources Management, Vienna, Austria, 21-25 May, 2007. **IAEA-CN-151/125**

Molerio León, L.F. (2014): **Particularidades del aprovechamiento sostenible de los recursos hidráulicos de pequeñas cuencas de montaña cársicas en el Trópico Húmedo: el Sistema Hidrológico de la Gran Caverna de Santo Tomás, Pinar del Río, Cuba**. Gota a Gota No. 4. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.):23-36 <https://sites.google.com/site/espeleovillacarrillo/>

Molerio-León, L.F. (2022): **Evaluación de los recursos hídricos de Cuba (I). Aguas subterráneas en el karst de montaña: Métodos de cálculo**. Gota a gota, nº 27 (2022): 69-78. Grupo de Espeleología de Villacarrillo. <https://www.researchgate.net/publication/367250987>

Molerio-León, L.F. (2023): **Hidrogeología de las regiones cársicas de Cuba: Marco conceptual**. Gota a gota, nº 28: 35-54. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.) <https://www.researchgate.net/publication/369089226>

Molerio-León, L.F. (2024): **Revisión de algunos conceptos en la hidrogeología cársica cubana** El Igepitosaurio. Boletín del Grupo IGP-SCG, La Habana, Año 12(141), Marzo de 2024, La Habana:5-6revisión

Molerio-León, L.F. y Ana M. Sardiñas (2023): **Evaluación de los recursos hídricos de Cuba (II): Dominio de los acuíferos cársicos, regionalización y recursos potenciales de agua subterránea**. Gota a gota, nº 29: 33-46. Grupo de Espeleología de Villacarrillo, G.E.V. (ed.)[12](#)

Molerio León, L.F.; E. Flores Valdés; M. Guerra Oliva; A. Menéndez Gómez; C. Bustamante Allen; E. Rocamora Alvarez (1998b): **Evaluación, Aprovechamiento y Protección de las Aguas Subterráneas en las Zonas de Montaña de Cuba**. Geología y Minería '98. Memorias, Volumen I, Versiones Resumidas: 441-444

Molerio León, Leslie F.; A. Menéndez Gómez; E. Flores Valdés; M.G. Guerra Oliva & C. Bustamante Allen (1996): **Aguas Subterráneas en las Zonas de Montaña de Cuba**. Voluntad Hidráulica (86):23-33

Molerio León, L.F.; A. Menéndez Gómez; E. Flores Valdés; M.G. Guerra Oliva & C. Bustamante Allen (1997): **Potencial y Recursos de Aguas Subterráneas en las Zonas de Montaña de Cuba**. in/D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín & I. Antigüedad (Eds.): **Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba**. Eibar, País Vasco: 211-224

Morejón Miranda, Yilian María, Marina Beatriz Vega Carreño, Antonio Escarré Esteve, José Luis Peralta Vital, Arely Quintero Silveiro, Julio Iván González Piedra (2015): **Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos**. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XXXVI(2): 94-108

Pérez Franco, Diosdado (1995): **La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque**. Edit. Científico Técnica, MTI, La Habana, 500:

Piñera, J., L.F. Molerio, C. March (1982): **Análisis de un modelo estadístico para la regionalización de las transmisividades en un polje**. Col. Internac. Hidrología del Carso de la Región del Caribe, UNESCO, La Habana: 302-321

Piñera, J., L.F. Molerio, C. March (1984): **Carácter probabilístico de las propiedades hidrogeológicas de las rocas acuíferas**. Ing. Hidráulica, La Habana (3):344-345

Piñón Abraham, Noraida, Iván González Piedra (2014): **Indicadores de los recursos hídricos de Cuba: análisis de la distribución territorial según división político – administrativa**. Revista Ingeniería Agrícola, 4(1), enero-febrero-marzo:29-35, 2014

Planos Gutiérrez, Eduardo O. (2022a): **Aproximación a los recursos hídricos potenciales en Cuba al 2030**. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XIII(1), Ene-Mar 2022:48-62

Planos Gutiérrez, Eduardo O. (2022b): **Consideraciones para el enfrentamiento al cambio climático en el sector de los recursos hídricos. Elevar la prioridad del agua y del sector**. Presentación al PNUD, La Habana, 29:

Planos Gutiérrez, Eduardo O. y Tomás L. Gutiérrez Pérez Cuba (2020): **Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2020**, Edit. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Edit. CITMATEL, La Habana, 402:

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:

Planos Gutiérrez, Eduardo O. (2022): **Consideraciones para elevar la prioridad del agua en el enfrentamiento del Cambio Climático. Basado en la gestión estratégica del agua a través de una visión integrada de la reducción de riesgos de desastres y la adaptación al Cambio Climático**. (inédito), La Habana, 31:

Plotnikov, N.I. (1962): **Resources en eaux souterraines: classification et méthodes d'évaluation**. Ed. Gauthier Villars, Paris

Plotnikov, N.I. (1968): **Búsqueda y exploración de aguas subterráneas dulces para suministro a gran escala a la población (Tomo 2)**. MGU, Moscú, 713:

Quinodoz, Hernán A. M. (1996): **Managing Uncertainty in Groundwater Yield Estimates**. Kansas Geological Survey, Open-file Report 96-63, 18:

Refsgaard, Jens Christian, Steen Christensen, Torben O. Sonnenborg, Dorte Seifert, Anker Lajer Højberg, Lars Trolborg (2011): **Review of strategies for handling geological uncertainty in groundwater flow and transport modeling**. Advances in Water Resources, Elsevier:36-50

Sánchez-Sánchez, Y., C. De Miguel Fernández, y S. Rochenel (2013): **Caracterización hidrogeológica del Valle del Cauto, Cuba**. Minería y Geología, 29 (2): 16-34.

Savariensky, F.P. (1934): **Hidrología (en ruso)**. Ed. Gos. Gern. Geol. Neft.

Schoeller, H. (1962) : **Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, Exploitation et Evaluation des Ressources**. Mason et Cie.Paris, 642:

Siline-Beckchourine, A. (1964?): **Hydrogeology of irrigated lands**. Foreign Lang. Publ House, Moscú, 110:

TNO (1983): **Methods and instrumentation for the investigation of groundwater systems**. Proc. Internatl Symp. The Hague., 669:

Todd, David Keith (1973): **Hidrología del agua subterránea**. Edit. Organismos, La Habana, 384:

Todd, David Keith; Larry W. Mays (2005): **Groundwater Hydrology**. John Wiley & Sons, 636:

Varela Morejón, E.; L.F. Molerio León & M. Guerra Oliva (1978): **Comportamiento Hidrodinámico de la Surgencia de La Gloria, Valle de San Juan, Matanzas**. *Voluntad Hidráulica*, La Habana:1-3

Vrba, J., y L. Dvorak (1967): **Informe preliminar sobre investigaciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas de algunas regiones de Isla de Pinos**. Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geología y Paleontología, Serie Isla de Pinos No. 19.

Wayland Eheart, J., Albert J. Valocchj (1986): **Multicriteria management of groundwater quality under uncertainty**. Department of Civil Engineering, University of Illinois, Project Completion Report, Project No. G-90403, 35:

Yazvin, L (1972): **Certidumbre de los cálculos hidrogeológicos durante la evaluación de las reservas de explotación de las aguas subterráneas** (en ruso). VSEGINGEO, Moscú, 149:

Zanini, A., A. Feo, E. Petrella, F. Celico (2021): **Groundwater modeling in karst areas**. *Water*, 13(6), 10–12

Foro de discusión Discussion Forum

A sugerencia de uno de nuestros lectores, a partir de la revista de agosto de 2022, 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.



Convocatoria

La Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), a través del Departamento Académico de Ciencias de la Tierra en colaboración con El Instituto Nacional de Geoquímica A.C. (INAGEQ), invitan a la comunidad de investigación en Ciencias de la Tierra y Ciencias afines a la química de los sistemas terrestres a participar en el XXXIV Congreso Nacional de Geoquímica-INAGEQ 2024, que se llevará a cabo del 07 al 11 de octubre de 2024 en modalidad presencial en las instalaciones de la UABCS.

Áreas temáticas

El INAGEQ agrupa a toda la comunidad científica relacionada con la geoquímica y ciencias de la Tierra del país, y dentro de sus actividades está la organización de eventos que permitan difundir los logros científicos alcanzados. Estos eventos fomentan la convivencia, el intercambio de ideas y promueven la formación de recursos humanos en las siguientes áreas temáticas:

- **Biogeoquímica**
- **Geoquímica Ambiental y Salud**
- **Geoquímica de Isótopos y Geocronología**
- **Geoquímica Marina**
- **Geoquímica de Yacimientos Minerales y Minería**
- **Geoquímica de la Educación**
- **Geotermia**
- **Hidrocarburos**
- **Hidroggeoquímica e Hidrogeología**
- **Procesos Contaminantes en Cuencas Hidrológicas y Cuerpos de agua**
- **Petrología Sedimentaria, Ígnea y Metamórfica**
- **Química Analítica**
- **Petroquímica**
- **Química Atmosférica**
- **Vulcanología**
- **Geoarqueología**

Actividades contempladas

Ponencias Magistrales

(Por definir número y temática).

Excursiones (en proceso los destinos).

- Cursos inter-congreso: 07, 08, 09, de octubre de 2024.

¿Interesados en impartir un curso? Comuníquense con el comité organizador inageq24@uabcs.mx o con japerez@uabcs.mx.

- **Congreso** (Conferencias Magistrales y Secciones Técnicas): **07, 08, 09 y 10 de octubre de 2024** (tentativamente, depende del número de conferencias).

- Premios para las mejores ponencias por alumnos (licenciatura, maestría y doctorado).

- Exposiciones comerciales (información y contactos).

Fechas a considerar

Primera circular

02 de abril de 2024

Cursos

31 de mayo de 2024: Fecha límite para recepción de propuestas para cursos.

Resúmenes cortos

20 de agosto de 2024: Fecha límite para recepción de resúmenes cortos con máximo 300 palabras.

10 de septiembre 2024: Respuesta por pares evaluadores.

22 de septiembre de 2024: Fecha límite para el pago de inscripción y de resumen. De este pago depende la inclusión de la participación en el programa final (resumen y programación de la ponencia).

Resúmenes en extenso

20 de agosto de 2024: Fecha límite para recepción de resúmenes en extenso con máximo 8 cuartillas.

10 de septiembre de 2024: Respuesta por pares evaluadores.

22 de septiembre de 2024: Fecha límite para el pago de inscripción y de resumen. De este pago depende la inclusión de la participación en el programa final (resumen y programación de la ponencia).

Los resúmenes serán sometidos al arbitraje de pares y su edición para publicación en ACTAS INAGEQ 2024 V. 30, ISSN-Latindex 2310-2799.



El pago, depósito o transferencia, deberá realizarse a través de la plataforma UABCS a nombre de la Universidad Autónoma de Baja California Sur y enviar el comprobante al siguiente correo electrónico:

inageq24.finanzas@uabcs.mx

Para mayor información consulte la página web:

<https://siia.uabcs.mx/inageq24>

Información sobre el Congreso al correo electrónico: inageq24@uabcs.mx

Correo sobre temas relacionados a los resúmenes:

inageq24.resumen@uabcs.mx

Correo sobre temas relacionados con finanzas:

inageq24.finanzas@uabcs.mx

Normas editoriales

Lineamientos para resúmenes cortos

El resumen deberá estar escrito en letra Arial y tamaño 12. El idioma a usar será español e inglés. El título debe tener un máximo de 20 palabras, con mayúsculas y en negrita, excepto los nombres científicos. Los nombres de los autores deben iniciar con el primer nombre, en caso de un segundo nombre, este deberá de escribirse antes de los apellidos en minúsculas. Las afiliaciones deberán escribirse en letra itálica y minúscula. El nombre del autor que presentará el trabajo deberá estar subrayado. Indicar correo electrónico del autor que presentará el trabajo. Debe tener de cinco a siete palabras clave escritas en minúsculas. El resumen deberá estar escrito en español e inglés, en un solo párrafo con menos de 250 palabras, sin incluir el título, nombres, afiliaciones y palabras clave. Indicar si su trabajo es para presentación oral o cartel.

Lineamientos para resúmenes en extenso

Resúmenes en extenso deben enviarse en formato electrónico, en tamaño carta (21.59 x 27.94 cm), con margen de 2.5 cm por lado e interlineado 1.5, con espacio entre párrafos y sin sangría al inicio de cada párrafo. La tipografía general será Arial de 12 puntos y texto justificado, excepto en donde se indique. La extensión máxima de los manuscritos será de 8 cuartillas sin vínculos ni hipervínculos internos. Se redactarán en tercera persona y en tiempo pasado, excepto las conclusiones que llevan el verbo en presente.



Lineamientos para trabajos completos

Se regirán de acuerdo a las normas editoriales sugeridas en este apartado, con la extensión requerida.

Formato

Se solicita mantener un formato general organizado de la siguiente forma: Título: El título del manuscrito deberá ser breve, específico e informativo. Se escribirá en mayúsculas y minúsculas.

Autores: Escribir nombre y apellido del autor o autores, seguido por la institución de adscripción, ciudad y código postal. Proporcionar también la dirección de correo electrónico del autor a quien se dirigirá la correspondencia.

Resumen

El resumen debe presentarse en español, no deber ser mayor de 350 palabras, pero tampoco demasiado corto, pues deberá ser suficientemente informativo. El resumen deberá incluir los objetivos y métodos usados, así como los resultados y conclusiones sobresalientes. En el caso de resúmenes en extenso y artículos se deberá incluir también una traducción del resumen en inglés, seguido del resumen en español, y bajo el título de Abstract.

Palabras clave: Al final del resumen se deberá incluir de 4 a 6 palabras clave. En el caso de los resúmenes en extenso y los artículos, también se deberán incluir las respectivas palabras clave en inglés bajo el título de Keywords.

Texto

Además de lo anterior, los manuscritos en formato de resumen en extenso o artículo también deberán incluir las siguientes secciones: I) Introducción, II) Área de trabajo, métodos analíticos y materiales, III) Resultados, IV) Discusión y conclusiones, V) Agradecimientos y VI) Referencias bibliográficas en formato APA.

Encabezados

Los encabezados de capítulos y subcapítulos se ajustarán a la siguiente jerarquía:

Primer nivel: Mayúsculas, negritas.

Segundo nivel: Mayúsculas y minúsculas, negritas.

Tercer nivel: Mayúsculas y minúsculas, cursiva.

Cuarto nivel

Sangría de 0.75 cm, mayúsculas y minúsculas, cursiva, a renglón seguido. Si se requieren más subniveles, se podrán usar títulos escritos con letra mayúscula y minúscula, precedida por 1), 2), 3), etc., pudiendo seguir con a), b), c), etc. Se deberán colocar estos títulos al inicio del párrafo, dejando una sangría de 0.75 cm y terminando con punto. Estos títulos constituirán las jerarquías quinta y sexta.



Citas y referencias

Deberá verificarse que todas las citas bibliográficas referidas en el texto aparezcan en la lista de referencias al final del artículo y viceversa.

Se citará solo el apellido o apellidos del autor, sin incluir nombres ni iniciales, seguido del año de publicación: (Martínez, 1986). Si el nombre del autor es parte de la oración, solamente el año se escribirá entre paréntesis: Según Martínez Serrano (1993).

Cuando el trabajo citado tenga más de dos autores, se citará al primer autor seguido de "et al." p.ej. (Brown et al., 1974).

Para diferenciar las citas de un autor con el mismo año de publicación, las citas en el texto deberán listarse en orden cronológicamente ascendente, utilizando las letras a, b, c, etc. Las referencias bibliográficas deberán ser ordenadas alfabéticamente y en forma cronológica en el caso de tener más de una cita del mismo autor.

Los autores corporativos (dependencias gubernamentales, universidades, nombres de eventos, etc.) deben registrarse con el nombre completo, seguido por las siglas entre paréntesis, el año, etc.: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1980. Se recomienda no usar abreviaturas al momento de escribir la revista o edición relacionada a la cita bibliográfica. p.ej. Geological Society Bulletin, Vol.2 No.1, p. 35-68.

Figuras

Las figuras se entregarán integradas en el texto, numerándolas consecutivamente. Cada figura deberá estar acompañada de un pie de figura, que indique el número y la descripción de la misma. La descripción deberá ser precisa y contener la explicación de todos los símbolos y abreviaciones usados. Las figuras deben ser nítidas y su tamaño deberá estar en proporción a las dimensiones establecidas de la hoja. Los tamaños de letra y grosores de líneas se deben elegir considerando la reducción de tamaño necesaria. Usar escalas gráficas en lugar de factores de magnificación e incluir unidades de medida. Los mapas y croquis deberán tener indicado el Norte, tener por lo menos dos datos de coordenadas en cada eje, y presentar escala gráfica. Las localidades geográficas referidas en el texto deben estar incluidas en los mapas. Las referencias a las figuras en el texto se harán completas como: Figura 1.

Tablas

El tamaño de las tablas deberá estar en proporción a las dimensiones establecidas de la hoja. Si una tabla es demasiado grande, sepárela en dos o más tablas. El número y el título de cada tabla se colocarán en la parte superior de la tabla. Los títulos de las columnas deberán ser breves y las unidades de medida se escribirán entre paréntesis. No usar líneas de división entre columnas y filas. Las referencias a las tablas en el texto se harán completas como: Tabla 1.

Comité de Honor

Dr. Dante Arturo Salgado González

Rector de la Universidad Autónoma de Baja California Sur

Dra. Alba Eritrea Gámez

Secretario General de la Universidad Autónoma de Baja California Sur

Dr. Jesús Roberto Vidal Solano

Presidente del Instituto Nacional de Geoquímica

Dr. Arturo Joaquín Barrón Díaz

Secretario del Instituto Nacional de Geoquímica

Dr. Daniel Pérez Zárate

Tesorero del Instituto Nacional de Geoquímica

Dra. Mara Yadira Cortés Martínez

Jefa del Departamento Académico de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Baja California Sur

Organizado por

Departamento Académico de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Baja California Sur

Instituto Nacional de Geoquímica, A.C. (INAGEQ)

Coordinado por

Cuerpo Académico de Geología Peninsular Departamento Académico de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Baja California Sur

Comité Organizador

Dra. Mara Yadira Cortés Martínez

Dr. José Antonio Pérez Venzor

Dra. María Z. Flores López

Dra. Karen Velázquez Pedroza

Dr. Jobst Wurl

Dr. Tobias Schwennicke

Secr. DACT Yezenia Díaz Beltrán

Apoyo técnico (soporte)

Ing. Edgar Vargas Martínez

Jefe del Departamento de Sistema Integral de Información Administrativa (SIIA)

Evento co-patrocinado por

Universidad Autónoma de Baja California Sur, Instituto Nacional de Geoquímica, A.C.



07 al 11 de octubre de 2024

Universidad Autónoma de Baja California Sur

Departamento Académico de Ciencias de la Tierra La Paz, Baja California

Sur, México

02 de abril de 2024

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.

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

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

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



Geología Médica

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



GeoLatinas

<https://geolatinas.org/>



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



Asociación de Geólogos y Geofísicos Españoles del Petróleo

<https://aggep.org/>



Sociedad Geológica de España

<https://sociedadgeologica.org/>



Sociedad Cubana de Geología

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



Sociedad Dominicana de Geología

<http://sodogeo.org/>



Universidad Tecnológica del Cibao Oriental, República Dominicana

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





Pieza de Mayapán, Yucatán. INAH. MUSEO REGIONAL DE ANTROPOLOGÍA