

Geociencias UO

Volumen 4, número 2, julio-diciembre 2021.

<https://geocienciasuo.olmeca.edu.mx>

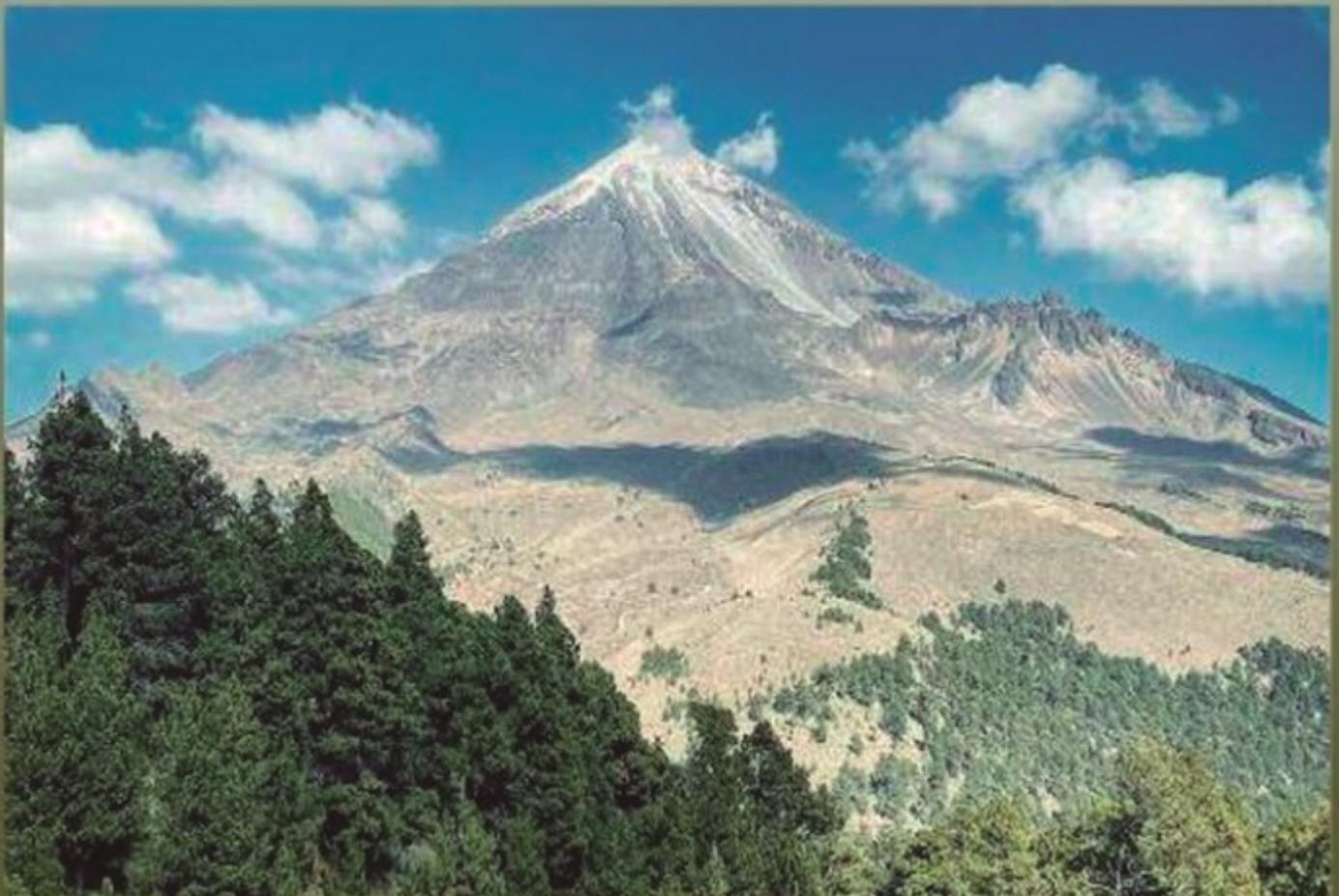


Imagen de la portada / Cover image / Imagem da capa

El Citlaltépetl, más conocido como Pico de Orizaba, es un volcán activo ubicado en los límites de los estados de Puebla y Veracruz (19° 01' 47.2" latitud norte y 97° 16' 07.8" longitud oeste), tiene una elevación de 5 636 m, su última erupción fue en 1846; está considerada la montaña más alta de México. La imagen fue tomada cerca de los 18° 59' 00.8" latitud norte y 97° 18' 39.5" longitud oeste, desde el volcán Sierra Negra en el estado de Puebla, en cuya cumbre se localiza el Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano, el mayor radiotelescopio del mundo en su rango de frecuencia. Fotografía de Ana Karen Castellanos, cuenta de Instagram @ana.cast17

The Citlaltépetl, better known as Pico de Orizaba, is an active volcano located in the limits of the states of Puebla and Veracruz, México. (19° 01' 47.2" north latitude and 97° 16' 07.8" west longitude), it has an elevation of 5 636 m, its last eruption was in 1846; it is considered the highest mountain in México. The image was taken near 18° 59' 00.8" north latitude and 97° 18' 39.5" west longitude, from the Sierra Negra volcano in the state of Puebla, on whose summit is located the Alfonso Serrano Millimeter Telescope, the largest radio telescope in the world in its frequency range. Photo by Ana Karen Castellanos, Instagram account @ana.cast17

O Citlaltépetl, mais conhecido como Pico de Orizaba, é um vulcão ativo localizado nos limites dos estados de Puebla e Veracruz (19° 01' 47.2" latitude norte e 97° 16' 07.8" longitude oeste), tem uma elevação de 5 636 m, sua última erupção foi em 1846; é considerada a montanha mais alta do México. A imagem foi tirada perto de 18° 59' 00.8" de latitude norte e 97° 18' 39.5" de longitude oeste, do vulcão Sierra Negra, no estado de Puebla, em cujo cume está localizado o Telescópio Milimétrico Alfonso Serrano, o maior radiotelescópio do mundo em sua faixa de frequência. Fotografia de Ana Karen Castellanos, conta do Instagram @ana.cast17

Comisión Técnica

Editores	Julio César Javier Quero	Marina del Carmen Rivera Domínguez
Revisores	Héctor de Paz (corrector de estilo)	José Alejandro Chablé Gómez
Trabajo de Imágenes	Brenda Ivonne Basurto Aguilar	

Esta publicación es el órgano de divulgación científica de la Universidad Olmeca, en ella se editarán artículos originales relacionados con las Ciencias de la Tierra y sus disciplinas, que hagan énfasis en trabajos desarrollados en Iberoamérica. La revista *Geociencias UO* aceptará solamente aquellos artículos que se apeguen a las normas editoriales, publicadas en <http://www.olmeca.edu.mx/>.

Las contribuciones tienen que estar redactadas en español.

This publication is the organ of scientific disclosure of the Olmeca University, in it, original articles related to the Earth Sciences and disciplines that make emphasis on works developed in Latin America will be edited.

The magazine *Geociencias UO* will accept only those articles that are stuck to the publishing standards, published in <http://www.olmeca.edu.mx/>.

The contributions must be written in Spanish.

Esta revista é uma publicação científica da Universidade Olmeca, na qual se editarão artigos originais relacionados às Ciências da Terra e suas disciplinas que enfatizem os trabalhos realizados na América Latina. A revista *Geoscience UO* aceitará apenas os itens que aderirem às diretrizes editoriais, publicado em <http://www.olmeca.edu.mx/>

As contribuições devem ser escritos em espanhol.

Geociencias UO, volumen 4, número 2, julio – diciembre 2021, publicación bianual, editada por la Universidad Olmeca, A. C., carretera Villahermosa – Macuspana km 14. Dos Montes, Centro, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México a través de la Coordinación Editorial, Tel: +52 (993)1879700. Ext. 1140 y 1141,

Website: geocienciasuo.olmeca.edu.mx, Correo electrónica: editorial@olmeca.edu.mx

Editor responsable: Julio César Javier Quero.

Responsable de actualización contenido online: José Alejandro Chablé Gómez

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2019-092513413800-102,

ISSN: en trámite.

Fecha última actualización: 19/12/2021

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de la Universidad Olmeca.

D. R. © 2022 Universidad Olmeca, A. C., Carretera Villahermosa-Macuspana, km 14, Dos Montes, Centro, C. P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización por escrito de la Universidad Olmeca, A. C.

Geociencias UO

Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca



<http://www.olmeca.edu.mx>

EDITORES EN JEFE

Francisco García Hernández

Doctor en Ciencias por la Colorado School of Mines
Investigador y experto en Petróleo.

Heberto Ramos Rodríguez

Maestro en ingeniería Petrolera por la UNAM y
maestro en Administración de Empresas por la
Universidad Olmeca.

CONSEJO EDITORIAL

Emilio Alberto De Ygartua Monteverde

Doctor en Ingeniería Constitucional Electoral por la
Universidad Carlos III de Madrid, España y doctor
en Gobierno y Administración Pública en el instituto
de Administración Pública del Estado de Tabasco.
Rector Universidad Olmeca, A. C.

Evelio Linares Cala

Doctor en Ciencias Geológicas por la
Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
Vicepresidente primero de la Sociedad Cubana de
Geología, periodo 2016-2020.

Beatriz Zumalacárregui de Cárdenas

Doctora en Química
Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

Francisco García Hernández

Doctor en Ciencias por la Colorado School of Mines
Investigador y experto en Petróleo.

Luzbel Napoleón Solórzano

Maestro en ingeniería petrolera por la UNAM.
Investigador y experto en Petróleo

Gabriel Enrique Baquedano Moreno

Maestro en Ciencias en Enseñanzas de las
Ciencias por el Centro interdisciplinario de
Investigación y Docena en Educación Catedrático
de la Universidad Olmeca.

Marco Antonio Maldonado Sánchez

Maestro en Ingeniería Petrolera por la UNAM.
Catedrático de la Universidad Olmeca.

Tomás Ramírez Maldonado

Doctor en Ciencias de la Ingeniería por la
Universidad Nacional Aeroespacial de Ucrania.

Nelson Esteban Salinas Rojas

Ingeniero Geólogo con especialidad en petróleo,
por la Universidad de Oriente en Venezuela.

Oswaldo Federico Donoso

Ingeniero en Minas por la Universidad de Santiago
de Chile. Investigador y experto en Petróleo.

Geociencias UO

Órgano de difusión científica de la Universidad Olmeca



<http://www.olmeca.edu.mx>

COMITÉ DE ARBITRAJE

Oswaldo Rodríguez Morán

Presidente del Comité de Arbitraje

Manuel Enrique Pardo Echarte

Doctor en Ciencias Geológicas.

Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE).

Investigador del Centro de Investigación del
Petróleo de Cuba.

Claudio Bartolini

Geólogo por la Universidad de Sonora, México;

Master en Geología/Ciencias de la Tierra,

Universidad de Arizona. Ph.D. en Geología/Ciencias
de la Tierra, Universidad de Texas en El Paso, EUA.

Miembro de la American Association of
Petroleum Geologists.

Oswaldo Rodríguez Morán

Master en Geología Petrolera, Universidad de Pinar
del Río, Cuba. Doctor en Ciencias Técnicas,
Universidad Tecnológica de La Habana.

Jorge Luis Torres Zafra

Máster en Ciencias Geológicas.

Instituto de Geología y Paleontología (IGP).

Servicio Geológico de Cuba.

Olga Castro Castiñeira

Doctora en Ciencias Geológicas.

Centro de Investigación del Petróleo.

Universidad Tecnológica de La Habana.

Norma Rodríguez Martínez

Doctora Ciencias Geológicas.

Académica de Mérito de la Academia de
Ciencias de Cuba.

Héctor Fernández Núñez

Master en Ingeniería Geofísica.

Doctor en Ciencias Técnicas.

Universidad Tecnológica de La Habana.

Reinaldo Rojas Consuegra

Master en Geología.

Doctor en Ciencias Geológicas.

Centro de Investigación del Petróleo de Cuba.

Virginia González Acosta

Master en Ciencias Geológicas.

Doctorado Ciencias de la Tierra.

UNAM, México.

Sumario

Presentación	<i>Emilio Alberto De Ygartua Monteverde</i>	68
Carta al editor	<i>Rosa María Valcarce Ortega</i>	69
Orientación de las excavaciones arqueológicas a partir del levantamiento de susceptibilidad magnética en el municipio de Guanabacoa, La Habana, Cuba.	<i>Oswaldo Rodríguez Morán, Orlando Carráz Hernández, Javier Ballote Álvarez y Lisette Roura Álvarez.</i>	71
Uso del Georradar en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión. Caso de estudio: Malecón habanero, Cuba.	<i>Ernesto Alejandro Hernández Martín, Javier Ballote Álvarez y Orlando R. Carraz Hernández</i>	85
Ubicación de elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental bajo las rocas del Arco Volcánico Cretácico y las ofiolitas para la exploración petrolera en Cuba.	<i>Aliss María Bejerano Kindelan, José Luis Gemen Prol Betancourt, Guillermo Miró Pagés y María Caridad Rifá Hernández</i>	100
Correlación estratigráfica del sector Morro-Cojímar en la Franja Norte de Hidrocarburos de Cuba	<i>Yaimeli Almaguer Álvarez, Osmany Pérez Machado Milán †, Lourdes María Pérez Estrada</i>	117



Presentación



Estimados lectores, tengo el placer de poner a su consideración la edición número ocho de la revista *Geociencias UO*, órgano de difusión científica de la Universidad Olmeque, la cual, como saben, está dirigida a estudiantes, profesionales, docentes, investigadores e interesados en los temas de las ciencias de la tierra.

En esta ocasión, aparte de ofrecer cuatro interesantes artículos de investigadores antillanos, por cierto, uno de ellos relacionado con excavaciones arqueológicas a partir del levantamiento de susceptibilidad magnética, damos a conocer la primera «Carta al editor» que nos han hecho llegar, se trata de un documento signado por la doctora Rosa María Valcarce Ortega, profesora titular del Departamento de Geociencias de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría; el escrito tiene el objetivo de compartir con la comunidad científica algunos elementos que la doctora Valcarce considera muy importantes sobre el artículo «Solución de casos utilizando el modelo de inversión para el análisis de elementos en la interpretación geofísica de pozos», de los autores Olga Castro Castiñeira y Yarilis Gómez Martínez, publicado en el Vol. 2, No. 2, en diciembre de 2019; esperamos que estas aportaciones tengan eco entre sus pares; esta carta nos motiva a redoblar esfuerzos, ya que demuestra que estamos teniendo presencia e interés entre la comunidad internacional de investigadores.

Por otra parte quiero recordarles que la revista *Geociencias UO* sigue el proceso de indexación, por lo que cada número que editamos nos acerca más a este objetivo.

Agradezco su preferencia y, por supuesto, a los colaboradores que nos consignan sus artículos les enviamos nuestro agradecimiento y los exhortamos a continuar investigando y compartiendo sus conocimientos a través de nuestra revista.

Dr. Emilio De Ygartua Monteverde
Rector

Carta al editor¹:

A: Mtro. Julio César Javier Quero
Responsable editor de la Universidad Olmeca

Excelentísimo rector, Dr. Emilio De Ygartua Monteverde, le presento mis respetos y saludos cordiales.

Motiva la presente la necesidad de compartir con la comunidad científica algunos elementos que considero muy importantes sobre el artículo «Solución de casos utilizando el modelo de inversión para el análisis de elementos en la interpretación geofísica de pozos», de los autores Olga Castro Castiñeira y Yarelis Gómez Martínez, publicado en el Vol. 2; No. 2; en diciembre del 2019.

Los métodos inversos permiten determinar las propiedades de un sistema a partir de datos observados. Esta es una situación que constantemente se presenta en las investigaciones geofísicas ya que se requiere conocer las propiedades de las formaciones geológicas a partir de mediciones de diferentes campos físicos. En los últimos años el empleo de los métodos inversos en la interpretación de los registros geofísicos de pozos tiene cada vez más importancia debido al elevado poder resolutivo que muestran siempre que el interpretador parta de un modelo lo más cercano posible a la realidad, para lo cual deberá hacer un adecuado análisis de toda la información disponible (análisis cualitativo de los registros, descripciones de núcleos y de muestras de canal, láminas delgadas, etc.).

Con gran acierto, en el artículo ya referido los autores demuestran las ventajas de utilizar los métodos de inversión para interpretar los registros geofísicos de pozos en presencia de litologías complejas y pre-

sentan estudios de casos en yacimientos gaso petrolíferos cubanos. Los autores parten de un modelo petrofísico que tiene en cuenta las litologías verdaderamente representativas de las formaciones geológicas presentes y logran calcular con elevada precisión los volúmenes de cada litología, el espacio ocupado por la porosidad y la saturación de fluidos, obteniendo bajos niveles de error al comparar los registros medidos y los registros calculados según los parámetros del modelo petrofísico calculado.

Es bien conocido que la presencia de arcilla en los reservorios reduce de manera significativa la porosidad efectiva y la permeabilidad del yacimiento, y que esta reducción depende no solo del volumen total de arcilla, sino de su distribución en la roca. En este sentido, considero muy importante destacar las posibilidades que brinda el método de inversión para evaluar el volumen de arcilla laminar, estructural y dispersa presente en las formaciones geológicas atravesadas por el pozo, tarea que no puede ser resuelta a través de la interpretación convencional de los registros geofísicos.

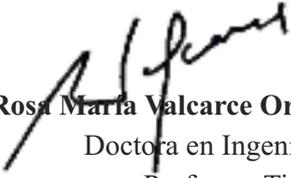
Ayala (2018) quien, a partir de los modelos desarrollados por Aquino *et al.* (2015), aplicó el método de inversión sobre registros de resistividad eléctrica, radiactividad gamma natural, porosidad neutrónica densidad y tiempo de tránsito para evaluar el volumen de arcilla laminar, estructural y dispersa a lo largo de los pozos interpretados. De esta manera logró evaluar y representar en profundidad el volumen de arcilla según su distribución en la roca, lo que permitió discriminar aquellos intervalos que aún presentado alta porosidad y alta saturación de hidrocarburos, carecen de interés al presentar altos contenidos de arcilla dis-

persa ya que ello provoca drástica reducción de la permeabilidad de los reservorios.

Debe destacarse la herramienta computacional *Petrofísica Inversión of Log Data*, para la inversión petrofísica de registros de pozos en carbonatos de triple porosidad, Tecnología IMP-PILD, desarrollada por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP, 2016) y que permite evaluar la porosidad de microfractura y vugular, la conectividad de sistemas de poros secundarios, la saturación de hidrocarburo móvil y residual, usando la inversión conjunta de registros convencionales de pozo.

En esencia, la aplicación de métodos inversos presenta ventajas respecto a la interpretación de los registros geofísicos de pozos por métodos convencionales. Es por ello que considero importante incentivar la publicación de investigaciones en esta temática así como profundizar en la enseñanza de estos aspectos en el pregrado y posgrado de los ingenieros geofísicos y otros especialistas afines.

Atentamente y deseándole éxitos en sus funciones;


Dra. Ing. Rosa María Valcarce Ortega
Doctora en Ingeniería.
Profesora Titular.
Departamento de Geociencias.
Facultad de Ingeniería Civil.
Universidad Tecnológica de la Habana
«José Antonio Echeverría», CUJAE

23 de septiembre 2021.

Aquino, A., 2015, Inversión conjunta de registros de pozos para la evaluación petrofísica en formaciones arenó – arcillosas anisótropas Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Instituto Mexicano del Petróleo, México.

Ayala, C., 2018, Estimación de propiedades petrofísicas usando los métodos de inversión petrofísica y convencional en yacimientos arenó arcillosos. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, México, 122 pp.

Instituto Mexicano del Petróleo, IMP, 2016, PILD, herramienta para el modelado e interpretación petrofísica de registros de pozo. <https://m.youtube.com> 10 de septiembre 2021.

Orientación de las excavaciones arqueológicas a partir del levantamiento de susceptibilidad magnética en el municipio de Guanabacoa, La Habana, Cuba

Oswaldo Rodríguez Morán¹, Orlando Carráz Hernández², Javier Ballote Álvarez³ y Lisette Roura Álvarez⁴.

¹ Ingeniero Geofísico. Máster en Geología Petrolera. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular e Investigador Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana, «José Antonio Echeverría», CUJAE, Ave 114 No. 11901, entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, C.P. 19390, La Habana, Cuba, ORCID: 0000-0001-9153-4603, Correo electrónico: ormoran2016@gmail.com.

² Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», Cuba. Ave 114 No. 11901, entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, C.P. 19390, La Habana, Cuba Correo electrónico: orlando@civil.cujae.edu.cu.

³ Ingeniero Geofísico. Profesor Instructor. Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», Cuba. Ave 114 No. 11901, entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, C.P. 19390, La Habana, Cuba Correo electrónico: javiab93@gmail.com.

⁴ Arqueóloga. Doctora en Ciencias Históricas. Gabinete de Arqueología de la OHC. Profesora Asistente. Universidad de La Habana, Cuba. ORCID: 0000-0003-0323-9116. Correo electrónico: roura@patrimonio.ohc.cu, roura144@gmail.com.

RESUMEN

Investigaciones arqueológicas recientes corroboran la existencia de movimiento humano en el territorio de Guanabacoa, La Habana, Cuba, desde el siglo XVI hasta la primera mitad del siglo XVIII. Se pretende identificar la ubicación del antiguo cementerio de la primera iglesia en la llamada Manzana 1, el cual sería el lugar de enterramiento de la población india que habitaba el territorio. De esta forma se verificaría, mediante el estudio del ajuar asociado a los enterramientos, el hecho de la inmigración de individuos procedentes de La Florida. Las evidencias materiales revelarían, además, los procesos sociales, históricos y culturales acaecidos y las influencias que estos pudieron ejercer en la cotidianidad de los habitantes del poblado. La falta de trabajos arqueológicos de campo en Guanabacoa retrasan las investigaciones sobre el tema. El objetivo de esta

investigación es el de orientar las excavaciones arqueológicas en la zona de interés a partir del levantamiento de la Susceptibilidad Magnética. Como premisa fundamental se consideró como zonas de interés, las establecidas por dos modelos: uno que se expresa con valores mínimos de susceptibilidad magnética bajo un nivel de fondo y el otro con valores máximo sobre el nivel de fondo. Como resultado, se ofrece la cartografía de las áreas propuestas para los trabajos arqueológicos, la cual racionaliza las excavaciones.

Palabras clave: susceptibilidad magnética, enterramientos humanos, excavación arqueológica, fosfatos.

ABSTRACT

Recent archaeological investigations corroborate the existence of human movement in the territory of Gua-

nabacoa, Havana, Cuba, from the 16th century to the first half of the 18th century. It is intended to identify the location of the former cemetery of the first church in the so-called Manzana 1, which would be the burial place of the Indian population that inhabited the territory. This would verify, by studying the trousseau associated with the burials, the fact of immigration of individuals from Florida. The material evidence would reveal, in addition, the social, historical and cultural processes that occurred and the influences that they could exert on the daily lives of the inhabitants of the town. The lack of archaeological field work in Guanabacoa delays research on the subject. The objective of this investigation is to orient the archaeological excavations in the zone of interest from the lifting of the Magnetic Susceptibility. As a fundamental premise, those established by two models were considered as areas of interest: one that is expressed with minimum values of magnetic susceptibility under one background level and the other with maximum values over the background level. As a result, the mapping of the proposed areas for archaeological works is offered, which rationalizes the excavations.

Keywords: magnetic susceptibility, human burials, archaeological excavation, phosphates.

RESUMO

Investigações arqueológicas recentes corroboram a existência de movimento humano no território de Guanabacoa, Havana, Cuba, do século XVI à primeira metade do século XVIII. Pretende-se identificar a localização do antigo cemitério da primeira igreja na chamada Apple 1, que seria o local de enterro da população indiana que habitava o território. Isso verificaria, estudando o enxoval associado aos enterros, o fato da imigração de indivíduos da Flórida. As evidências materiais revelariam, além disso, os processos sociais, históricos e culturais ocorridos e as influências que eles poderiam exercer no cotidiano dos habitantes da cidade. A falta de trabalho de campo arqueológico em Guanabacoa atrasa a pesquisa sobre o assunto. O objetivo desta investigação é orientar as escavações ar-

queológicas na zona de interesse a partir do levantamento da Susceptibilidade Magnética. Como premissa fundamental, as estabelecidas por dois modelos foram consideradas áreas de interesse: uma que se expressa com valores mínimos de suscetibilidade magnética sob um nível de fundo e a outra com valores máximos sobre o nível de fundo. Como resultado, é oferecido o mapeamento das áreas propostas para obras arqueológicas, racionalizando as escavações.

Palavras-chave: suscetibilidade magnética, enterros humanos, escavação arqueológica, fosfatos.

INTRODUCCIÓN

Estudios históricos-arqueológicos recientes (Rodríguez, 2002; Roura, 2014; Roura *et al.*, 2017; Roura, 2018), constatan la presencia de descendencia indígena en el municipio Guanabacoa, La Habana, Cuba, hasta la primera mitad del siglo XVIII, así como la producción cerámica que mantuvieron como elemento comercializable en el núcleo urbano de La Habana. Las huellas de estas transacciones son identificables a través de artefactos exhumados en los contextos arqueológicos intervenidos en La Habana Vieja, utilizando para su fabricación los afloramientos de arcillas ubicados en el antiguo pueblo de indios Nuestra Señora de la Asunción. Pero en este también se asentaron indios procedentes de diversas regiones americanas, entre los que se destacan, por su número, los que arribaron desde tierras floridananas. Es conocido el intenso trasiego de personas e intercambio de mercancías entre La Florida y La Habana a partir del siglo XVI, y aunque evidencias arqueológicas halladas en varias zonas habaneras confirman lo anterior, no se han efectuado intervenciones sistemáticas en áreas guanabacoenses que permitan ahondar en tan significativa cuestión. Las investigaciones arqueológicas en la zona de interés (**Figura 1**) permitirá constatar la trascendencia histórica de la fundación de Guanabacoa como reserva india, las relevantes relaciones comerciales establecidas con individuos procedentes de La Florida, la importancia de estos factores en la conformación del etnos en la región habanera, y de la evolución del po-

blado-villa-municipio mediante la expansión urbana tomando como punto de partida la ubicación de la primera iglesia y cementerio (Roura *et al.*, 2019).

Según Larrúa (2014), en Roura *et al.* (2019), entre los siglos XVI al XVIII los floridanos llegaban en canoas a La Habana y desembarcaban en la Plaza de San Francisco con sus mercancías: carnes secas, pescados, tortugas, ámbar gris, cerámicas y pieles. Hacia 1580, el fuerte olor del pescado molestaba a los

vecinos y se les asignó un sitio al otro lado de la bahía para que efectuasen las ventas. Con el tiempo, algunos indios floridanos fueron a vivir allí y así nació el pueblo de Casablanca. Otros se asentaron en Guanabacoa, donde fundaron familias, desarrollaron el comercio, progresaron y los testamentos dan fe de que legaron a sus descendientes adornos de oro, piedras preciosas, telas y grandes sumas en monedas de oro y plata.

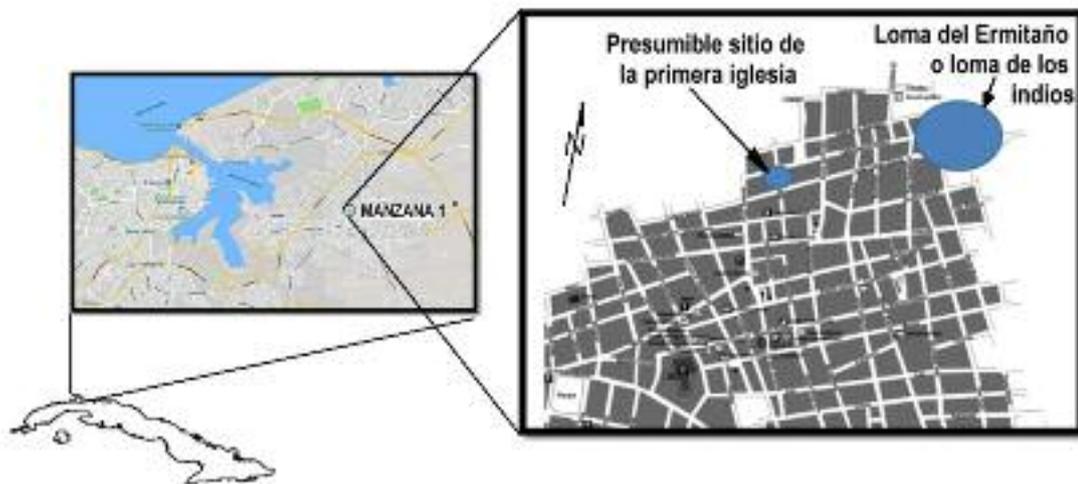


Figura 1. Ubicación de la zona de interés arqueológico.

Las técnicas geofísicas se han empleado históricamente para la investigación de las geoesferas o estructuras internas de la Tierra, donde las profundidades y dimensiones superan la resolución vertical de dichos métodos. No obstante, en el caso de estudios de zonas superficiales del subsuelo o de estructuras reducidas relacionadas con la actividad antrópica, se requiere una mayor resolución vertical de los métodos de prospección geofísica (Blanch, 2016). Estas características de heterogeneidad y de los fenómenos de atenuación de dichos medios entorpecen las prospecciones, de modo fundamental en los primeros metros de estudio. Los métodos geofísicos más apropiados para prospección arqueológica de alta precisión a gran escala son las mediciones magnéticas, el cual es de los primeros métodos geofísicos utilizados en la prospección arqueológica, la tomografía eléctrica y las mediciones de georadar. El objetivo de este artículo es el de orientar de forma ra-

cional las excavaciones arqueológicas a partir del levantamiento de susceptibilidad magnética (SM).

MATERIALES Y MÉTODOS

La susceptibilidad magnética es la medida de un material susceptible de ser magnetizado (Reynolds, 2011), de ahí que se puedan detectar anomalías en función de las diferencias de los contrastes debidos a este atributo. En la arqueología se emplea para detectar restos vinculados al fuego, basándose en el magnetismo del suelo (Scollar 1965; Mullins 1974; Graham 1976 en Díaz, 1993). La susceptibilidad magnética representa un método rápido, no solo en la adquisición de los datos, sino en el procesamiento posterior y por si fuera poco, es un método no invasivo (no destructivo) al objeto de investigación.

Según Molina (2016), la susceptibilidad magnética es una técnica emergente forense, la cual ha te-

nido éxito en varios ambientes simulados y con diferentes objetivos enterrados, además ha diferenciado muestras de suelo. Se ha utilizado poco independiente del incentivo de lo económico y práctico del método.

Las mediciones magnéticas son muy útiles para, identificar los minerales magnéticos del suelo (Vázquez *et al.*, 2018), pero también muestra su utilidad en la determinación de zonas de ausencia o bajos valores de susceptibilidad magnética, rodeados de valores mayores.

También, Fassbinder (2012) y Díez (1993) en Crespo *et al.* (2015) describe las causas de varios tipos de anomalías positivas de susceptibilidad magnética y asevera que: «también las hay negativas (referente a las anomalías de susceptibilidad magnética) –cuando el material de la estructura arqueológica presenta una susceptibilidad magnética inferior a la del suelo adyacente– que, por simple contraste, se prestan a una lectura similar».

Acerca de los referentes históricos de los indios naturales y floridanos en Guanabacoa, se tiene que la población que pertenecía a la jurisdicción de La Habana hasta 1743, se fundó en el año 1554 como pueblo de indios, en un entorno natural cuya altura máxima es de 73 msnm. La llamada Loma del Ermitaño o Loma del Indio, fue la zona en que originalmente se asentaron los indios naturales una vez establecida la reducción, y en el año 1586 fueron instalados por las autoridades religiosas, con el apoyo del gobierno colonial, a abandonar dichos predios para reinstalarse en los alrededores de la modesta iglesia que se había levantado en el área comprendida entre las actuales calles Raoul Suárez (Amenidad), Calixto García (Camposanto), Estrada Palma (Cerería) y Pepe Antonio (Las Damas), en la llamada Manzana no. 1 (Figura 1 y 2). A partir de entonces, los enterramientos de todos los fallecidos se efectuaron en el cementerio de la pequeña iglesia, que por sus reducidas dimensiones estuvo situada tanto en su interior, como en sus alrededores, tal y como sucedió en la Ermita de Potosí, templo que se levantara en el siglo XVII en las afueras de dicho poblado (Roura *et al.*, 2019).

Según Pringle *et al.* (2008), la susceptibilidad



Figura 2. Ubicación del Patio 2, lugar del levantamiento de susceptibilidad magnética.

magnética ha sido utilizada comúnmente en las búsquedas arqueológicas, y se ha reconocido que en las zonas de superficies quemadas, el óxido de hierro débilmente magnético, donde los minerales de hematita y goethita (por ejemplo) son transformados en minerales de magnetita de muy magnético y maghemita a través del calor y el fuego, esta premisa se denominará Modelo 1 (Figura 3). Un máximo de susceptibilidad magnética puede producirse además por la actividad biológica natural (Linford, 2004; Dalan, 2010; Bigman, 2014; Pringle *et al.*, 2015).

Otras influencias que provocan la transformación de minerales de débiles a energicamente susceptibles ocurre por la:

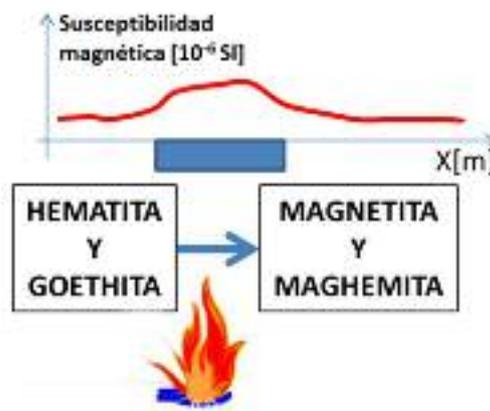


Figura 3. Esquema que muestra la transformación en minerales de magnetita de muy magnético y maghemita a través del calor y el fuego partir de los minerales de hematita y goethita (Modelo 1).

- Intemperie.
- Patogénesis.
- Metabolismo bacterial.
- Reducción química durante la descomposición de materia orgánica.
- Oxidación química debido al fuego.

Sobre la base de las premisas, que permiten utilizar al método de susceptibilidad magnética como detector de enterramientos humanos, Argote (2002), expresa que los suelos compactados por la ocupación humana o alterados por algún enterramiento funerario, también muestran cierta variación en los valores de fondo de la susceptibilidad magnética. Los entierros usualmente causan una oxidación local creando un vacío en el contenido de magnetita.

Según Binder *et al.* (2012), «...la prospección química ha permitido la detección de asentamientos arqueológicos y el despliegue de una serie de estudios sustentados en la premisa de que toda actividad humana genera alteraciones tanto físicas como químicas. En efecto, los análisis químicos para localizar/delimitar sitios y determinar “áreas de actividad”, cuentan ya con más de medio siglo de aplicación en el ámbito de la Arqueología».

Más adelante Binder *et al.* (2012) dice: «En el caso particular del fósforo, las investigaciones demostraron que es altamente estable, por lo que permanece depositado durante prolongados períodos. Cuando se descompone la materia orgánica se inicia la instancia de adición de fósforo al suelo en forma de fosfato, esto es, el fósforo de origen biológico (orgánico) forma fosfatos insolubles (minerales o fosfato inorgánico) [...]. Dado que artefactos y ecofactos contienen fósforo, como así también el propio ser humano (es decir, el tejido duro como los huesos y el tejido blando como la carne y la piel), éste se acumula y queda depositado. El fósforo orgánico ya depositado es transformado en inorgánico por microorganismos que lo mineralizan, al tiempo que disuelven el fósforo inorgánico emitiendo ácidos orgánicos y dióxido de carbono».

De acuerdo con Binder *et al.* (2012), hay un vínculo importante entre los fosfatos respecto a la de-

tección de inhumaciones clandestinas. Se revela un caso en Sudamérica. Se trata de la intervención realizada en Vallegrande (Bolivia) con el fin de determinar el lugar de entierro de Ernesto Che Guevara y de los miembros de la columna guerrillera cubano-boliviana bajo su mando. El equipo de investigación implementó técnicas geofísicas y geoquímicas. Con respecto a las segundas, se realizaron los análisis de *pH* y fosfatos de unas 1300 muestras. Aunque debido a una serie de inconvenientes (no vinculados con la técnica) la inhumación fue detectada a partir del trabajo con maquinaria pesada; una vez recuperados los restos óseos y materiales asociados, dicho equipo tomó 208 muestras del suelo en la fosa a intervalos de 0.25 m en el área de 12 m² que comprendía la misma. Las muestras fueron sometidas a análisis de fosfatos, *pH* y color de suelo. Esto permitió comprobar la potencialidad de localizar restos humanos empleando estas pruebas.

Según Iglesias-Santamarina (2019), los fosfatos de hierro forman parte de las familias de compuestos más conocidas del reino mineral. El ejemplo más sorprendente de un fosfato de hierro poroso lo constituye la cacoxenita $[AlFe_{24}(OH)_{12}(PO_4)_{17}(H_2O)_{24}] \cdot 51 H_2O$. Más adelante continúa diciendo «La naturaleza de estas uniones determina, no solo, la estructura del compuesto, sino también las interacciones magnéticas. Las interacciones de intercambio magnético dependen, entre otros factores, de los átomos a través de los que se unen los cationes, del ángulo de estos enlaces y del estado de oxidación. Generalmente, las interacciones entre orbitales *d* de los iones de hierro acoplados a través de grupos fosfatos son antiferromagnéticas débiles», esta premisa se denominará (Modelo II) (**Figura 4**).

Con objetivos centrados en la localización de restos humanos, Pérez *et al.* (1996), dicen que el modelo a esperar puede ser un medio caracterizado por la baja resistividad, baja susceptibilidad magnética, baja velocidad y tiempos altos de propagación de la onda reflejada, así como la poca diferenciación de las propiedades resistivas y de velocidades entre dos medios que puede ser uno solo. De esta forma, continúa diciendo Pérez *et al.* (1996), entonces se considera de hecho, una zona de enterramiento.

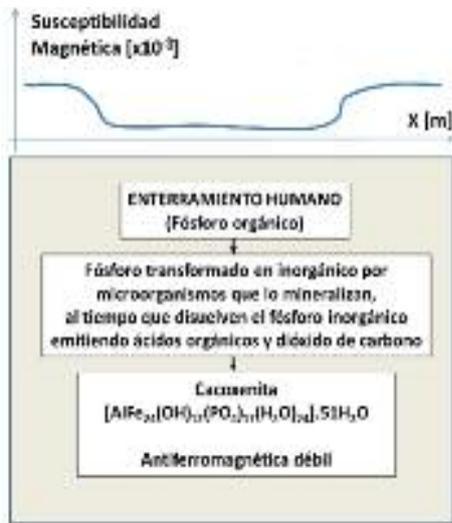


Figura 4. Diagrama del fundamento físico-químico para la utilización de los levantamientos de susceptibilidad magnética en la revelación de enterramientos humanos (Modelo 2).

Fueron trazados 8 perfiles, los cuales no cubrieron toda el área, por la presencia de árboles *et al.* elementos difíciles de remover del lugar (**Figura 4**). Los perfiles fueron trazados de norte a sur con 1 metro de separación y un espaciamiento entre puntos de 0.5 metros. El perfil 5 no se realizó pues coincidía con una alineación de árboles y varias barras metálicas de un garaje en desuso. En total se realizaron observaciones en 220 estaciones y 514 mediciones de control. En

cada una de las estaciones se realizaron entre tres y cinco determinaciones para lograr un valor promedio y más confiable. Las mediciones se realizaron con un kapámetro KT-10 S/C, de la firma TerraPlus, el cual posee una sensibilidad de 10^{-6} SI.

El sombreado en el esquema (a) de la **Figura 4**, representa una capa de hormigón de algunos pocos centímetros, que supondrá un apantallamiento a las mediciones de la susceptibilidad magnética.

El levantamiento se realizó en el horario comprendido entre las 10 am y las 2 pm. El suelo se encontraba un poco húmedo al comienzo de las mediciones, pues acontecieron lluvias al amanecer, pero al concluir el primer perfil, el suelo y hojas se encontraban perfectamente secas.

Se empleó un sistema de referencia relativo con centro (0, 0) en el punto ubicado en el extremo noreste del área (**Figura 5**). Considerando positivas los valores de Y hacia arriba y los valores de X hacia la derecha.

De modo general los pasos fundamentales del procesamiento fueron:

- 1) Por perfil:
 - Determinación de los valores ráfagas.
 - Estimación del Nivel de Fondo (NF).
 - Análisis estadístico de los valores de niveles de fondo.

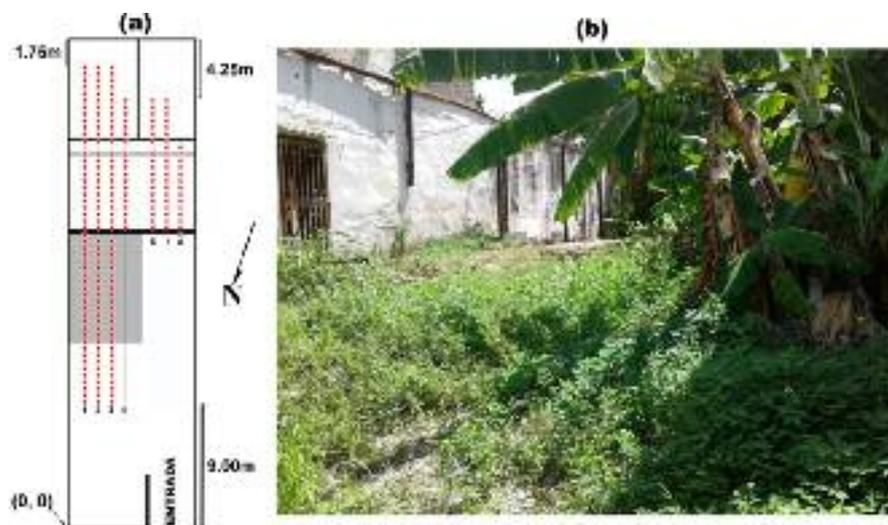


Figura 5. (a) Esquema de ubicación de los perfiles de medición en el levantamiento de susceptibilidad magnética en el área de interés. (b) Vista del Patio 2 desde la perspectiva de la entrada de acceso (Calle Estrada Palma).

- Normalización de los valores de la SM.
- Establecimiento del índice de trabajo.

2) Areal:

- Regionalización de la variable y mapa de isolíneas.
- Interpretación.

Determinación de los valores ráfagas. Una magnitud será considerada ráfaga con respecto a su entorno. Según Pardo *et al.* (2005), si la serie de datos secuenciales se ordena de forma creciente de sus valores, entonces, para que un valor de la serie no sea considerado como ráfaga debe cumplir la condición dada por la **Ecuación (1)**:

$$X_i - \frac{C_i X_i}{2} \leq X_{i-1} \leq X_i + \frac{C_i X_i}{2} \quad (1)$$

si

$$C_i = -0.0915 \log(X_i) + 0.5986 \quad (2)$$

Donde

X_{i-1} Valor de la serie al cual se evaluará como ráfaga o no.

X_i Sucesor de X_{i-1} de la serie ordenada de forma creciente.

C_i Coeficiente que dependerá de la magnitud de X_i y representará la magnitud que servirá para establecer un intervalo alrededor del valor del punto, para la clasificación de magnitud ráfaga.

La **Ecuación (2)** fue determinada a partir de una modelación experticia según Pardo *et al.*, (2005).

Estimación del Nivel de Fondo (NF). Después de eliminados los valores ráfagas, se utilizarán el 30% de los primeros valores de la serie de datos secuenciales ordenada de forma creciente para determinar el valor de fondo del atributo.

Análisis estadístico de los valores de niveles de fondo. Partiendo de los valores de NF de cada uno de los perfiles, se determinará si hay una independencia esta-

dística entre ellos. De esta forma se podrá generalizar los valores de NF o particularizarlo de forma local para algunos perfiles. Para ello se utiliza la **Ecuación (3)** para aplicar la prueba de significación a partir de las diferencias de las medias muestrales (Spiegel, 1971).

$$Z_{ij} = \frac{(\bar{x}_i - \bar{x}_j)}{\sqrt{(\frac{\sigma_i^2}{n_i} + \frac{\sigma_j^2}{n_j})}} \quad (3)$$

Donde:

- \bar{x}_i Valor del Nivel de Fondo del Perfil i.
- \bar{x}_j Valor del Nivel de Fondo del Perfil j.
- σ_i Varianza del Nivel de Fondo del Perfil i.
- σ_j Varianza del Nivel de Fondo del Perfil j.
- n_i Cantidad de valores para el cálculo del NF para el Perfil i.
- n_j Cantidad de valores para el cálculo del NF para el Perfil j.
- Z_{ij} Estadígrafo para la prueba de la diferencia de las medias entre los perfiles i y j.

Se establecieron las hipótesis de trabajo:

- Hipótesis básica ($H_0 : \mu_i = \mu_j$). Los NF de los perfiles i y j, poseen estadísticamente igual valor.
- Hipótesis alternativa ($H_1 : \mu_i \neq \mu_j$). Los NF de los perfiles i y j, poseen estadísticamente diferente valor.

Si para un nivel de confiabilidad α se tiene que: $Z_{\alpha/2} (\alpha/2) < Z_{ij} < Z_{1-\alpha/2} (1-\alpha/2)$, entonces la hipótesis básica es cierta, lo que significa que los NF de los perfiles i y j son iguales estadísticamente.

Si sucede que: $Z_{ij} < Z_{\alpha/2} (\alpha/2)$ o $Z_{ij} > Z_{1-\alpha/2} (1-\alpha/2)$, entonces la hipótesis básica es nula y se acepta la alternativa, lo que significa que los NF de los Perfiles i y j son diferentes estadísticamente.

Normalización de los valores de la SM. Con el establecimiento del valor del NF para cada perfil se calculan los valores de susceptibilidad magnética normali-

zados a partir del doble de NF menos uno, según la Ecuación (4).

$$SMn_i = \frac{SM_i}{NF} \quad (4)$$

donde

SM_i Valor de susceptibilidad magnética en la estación i-ésima.

NF Valor del Nivel de Fondo de los valores de la susceptibilidad magnética.

SMn_i Valor de susceptibilidad magnética normalizada (SMn) en la estación i-ésima.

Estos valores de susceptibilidad magnética normalizada son adimensionales y se obtienen a partir del cociente entre el logaritmo respectivo del valor medido en cada estación sobre el valor del Nivel de Fondo menos uno.

Las zonas donde la $SMn_i > 0$, se obtendrán los resultados a partir de las premisas establecidas por el Modelo 1. De lo contrario, las zonas donde $SMn_i < 0$, serán interpretadas bajo los presupuestos del Modelo 2. De esta forma los signos de los valores de la SMn facilitará la interpretación espacial sobre un modelo de búsqueda u otro.

Regionalización de la variable y mapa de isolíneas.

Para generalizar espacialmente los valores de la SMn se aplicó el método de la curvatura mínima, pues por experiencia de los autores, para este tipo de datos, este método realiza adecuadas interpolaciones.

Interpretación. Se establecerán resultados que

Perfiles	Nivel de Fondo [10-6 SI]
1	0.67
2	0.37
3	0.66
4	0.67
6	5.95
7	6.25
8	6.15

Tabla 1. Valores estimados del Nivel de Fondo de cada uno de los perfiles.

respondan a cada uno de los dos tipos de modelos, es decir tanto para anomalías positivas como para anomalías negativas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se procesaron los perfiles de susceptibilidad magnética (SM) y se obtuvieron los valores de ráfaga y Nivel de Fondo. La posición de los valores ráfagas pasarán a ser valores ausentes. En la **Tabla 1**, se muestran los valores obtenidos de los respectivos niveles de fondo de cada perfil.

Podrá apreciarse cada uno de los perfiles y la representación de los niveles de fondo en las **figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12**, además, junto con las estaciones de los perfiles se ha colocado, entre corchetes, una simbología que representa de forma general las características del suelo en que se realizó la medición de la susceptibilidad magnética. Utilizaremos para designar la característica del suelo de la siguiente manera: Suelo (S), Muro de hormigón (M), Concreto (C), Suelo con piedras (P) y Ladrillo (L).

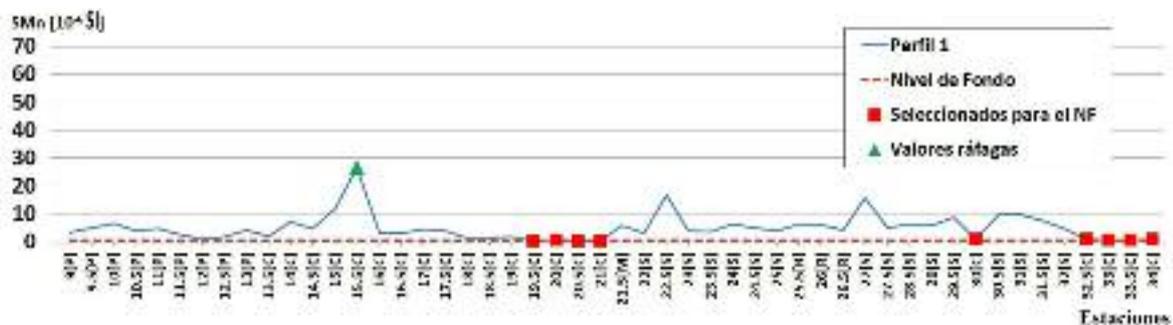


Figura 6. Perfil 1 de las observaciones de la susceptibilidad magnética.



Figura 11. Perfil 7 de las observaciones de la susceptibilidad magnética.



Figura 12. Perfil 8 de las observaciones de la susceptibilidad magnética.

A partir del 30 % de los valores de todo el perfil, de la secuencia de datos ordenados de forma creciente, se obtuvieron los valores de fondo de cada perfil. En la **Tabla 2** se muestran los resultados de la prueba de hipótesis para la comparación de las medias de las poblaciones mutuas de valores que llevaron a obtener los niveles de fondo de cada perfil, para un valor de $\alpha = 5\%$. Este resultado es apreciado en la **Figura 13**, donde los

niveles de fondo de los perfiles 1, 3 y 4 pertenecerán a una misma población, los NF de los perfiles 6, 7 y 8 otra población bien definida, y de forma independiente el NF del Perfil 2.

En la **Tabla 3** se generalizan los Niveles de Fondo para cada una de las tres poblaciones establecidas. Estos niveles de fondo serán los utilizados en obtener los valores de susceptibilidad magnética normalizada a partir de la **Ecuación (4)**.

Se utilizaron los niveles de fondo generalizados de la **Tabla 3** para calcular la susceptibilidad mag-

		PERFILES							
		1	2	3	4	6	7	8	
PERFILES	1		H1	Ho	Ho	H1	H1	H1	
	2			H1	H1	H1	H1	H1	
	3				Ho	H1	H1	H1	
	4					H1	H1	H1	
	6						Ho	Ho	
	7							Ho	
	8								Ho

Tabla 2. Resultados de la prueba de hipótesis para los NF de los perfiles.

Población	Perfiles	Nivel de Fondo
1	1,3 y 4	0.67
2	2	0.37
3	6, 7 y 8	6.12

Tabla 3. Valores generalizados del nivel de Fondo para cada una de las tres poblaciones estadísticamente establecidas para un $\alpha = 5\%$.

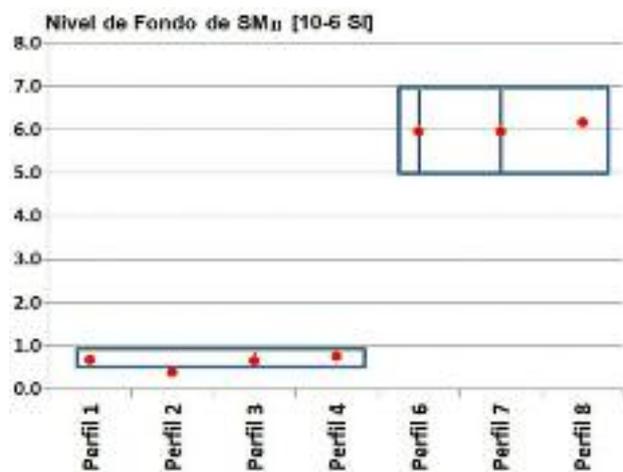


Figura 13. Gráfico de asociación de los NF en el que muestran las tres poblaciones estadísticamente independientes para un $\alpha = 5 \%$.

nética normalizada (SMn). Con la intención de establecer un indicador que asocie los valores de la SMn a las premisas del Modelo 1 y al Modelo 2 por separado, es que se elaboró un gráfico de barras para los valores del logaritmo de la SMn (**Figura 14**). Este gráfico de barras posee un valor mínimo de -1.281 y un valor máximo de 1.413, con un intervalo de clase de 0.108. Se aprecia en la **Figura 14**, tres poblaciones: la primera ubicada en el intervalo de -0.281 hasta -0.305, al cual se asociaría a posibles enterramientos humanos sobre la base de los presupuestos del Modelo 2. La segunda en el intervalo de -0.305 hasta 0.605, representa una población dudosa a partir de las causas que la generan. La tercera se establece en el intervalo de 0.605 hasta 1.413, asociada a probables enterramientos humanos a partir de las premisas del Modelo 1.

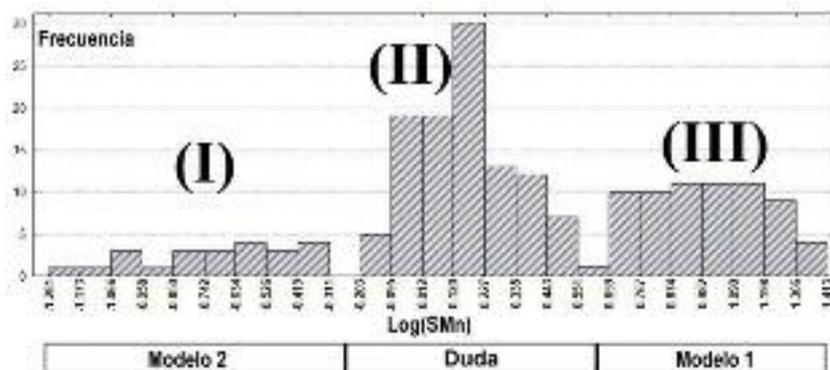


Figura 14. Gráfico de barras para los valores de SMn donde se expresan las poblaciones (I), (II) y (III).

Población	Media	Varianza	N
I	-0.745	0.061	20
II	0.155	0.038	110
III	1.007	0.040	65

Tabla 4. Valores de la media, varianza y cantidad de casos de cada una de las poblaciones de la **Figura 14**.

Estas poblaciones (I), (II) y (III) son independientes respecto a la media. Para la demostración de esta independencia en la **Tabla 4** aparecen los valores de la media, varianza y cantidad de casos para cada una de estas poblaciones.

La hipótesis básica ($H_0 : \mu_i = \mu_j$), refiere que las poblaciones comparadas son estadísticamente una misma población. La hipótesis alternativa ($H_1 : \mu_i \neq \mu_j$), refiere que las poblaciones comparadas no son estadísticamente una misma población.

A partir de la **Ecuación (3)** se calculó el estadígrafo para la prueba de la diferencia de las medias entre las poblaciones (I) y (II): $Z = 15.414$, y la Región Crítica se muestra a partir de $R_c (1-\alpha/2) = 2.576$, para un nivel de confiabilidad de $\alpha = 5 \%$. Por lo que se rechaza la hipótesis básica y se acepta la alternativa, de que las Poblaciones (I) y (II) son diferentes.

Para el caso de las poblaciones (II) y (III), $Z = 27.530$, y la Región Crítica se muestra a partir de $R_c (1-\alpha/2) = 2.576$, para un nivel de confiabilidad de $\alpha = 5 \%$. Por lo que se rechaza la hipótesis básica y se acepta la alternativa, de que las Poblaciones (II) y (III) son diferentes.

La **Figura 15** exhibe la regionalización de los valores del $\text{Log}(SMn)$, es decir, se georreferencian los resultados obtenidos en la **Figura 14**. La atenuación que de forma eventual provocaría la placa de hormigón, en apariencia no afecta a la variabilidad de los valores de SMn.

Se propone dirigir las excavaciones en las porciones del terreno establecidas para los Modelos 1 y 2, y desestimar los espacios definidos por la población de Duda. De forma especial, escavar en las áreas A y B señaladas en la **Figura 15**. Estas áreas contienen posibles fuentes asociadas al Modelo 1 y su contraste con la zona de Duda (área A) y el área B, asociada a los Modelo 1 y 2 y a la Zona de Duda. Esta propuesta responde a la posibilidad de contrastar los resultados de las excavaciones con las predicciones respecto a los dos modelos propuestos.

Resultados preliminares de la primera campaña de excavaciones.

Siguiendo el patrón propuesto, las primeras excavaciones se realizaron en el área A mediante una trinchera de 4 m x 2 m con diferentes profundidades de excavación (hasta aproximadamente 2 m) y revelaron la existencia de tres pisos o estratos culturales hasta llegar a una capa irregular de serpentinita. El piso 1 estaba compuesto de material de relleno descontextualizado de diferentes fuentes incluyendo fragmentos ferrosos irre-

gulares (**Figura 16**) y los pisos 2 y 3 con material provenientes de los siglos XIX y XVIII con cuantiosos restos cerámicos generalmente tipo Morro y México.

Las mediciones de susceptibilidad magnética realizadas a muestras de las cerámicas Morro y México utilizando el kapámetro portátil KT-10 S/C revelaron valores altos (**Tabla 5**) debidos presumiblemente a la presencia de abundantes minerales ferromagnéticos en la pasta original. Aunque estas mediciones son imprecisas, comparadas con las técnicas de laboratorio, arrojan resultados de interés que pudieran estar relacionados con las causas de algunas de las anomalías geofísicas presentes en el área de estudio.

CONCLUSIONES

La investigación bibliográfica concluye dos tipos de modelos con premisas opuestas para la localización de enterramientos humanos a partir de las mediciones de la susceptibilidad magnética: máximo relativo de valores de SMn (Modelo 1) y un mínimo relativo de valores de SMn (Modelo 2), ambos sobre una incidencia antrópica.

Se propuso un indicador a partir del logaritmo de la susceptibilidad magnética normalizada, el cual estará asociado indistintamente a los dos modelos establecidos: Modelo 1 y 2.

Otro resultado fue la regionalización del indicador propuesto en el área de interés y se propusieron

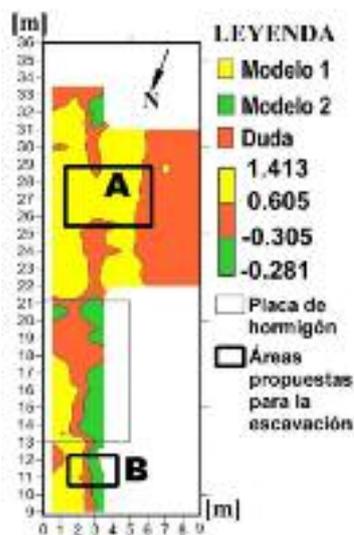


Figura 15. Regionalización de los valores del $\text{Log}(SMn)$, a partir de los resultados de la **Figura 14**.



Figura 16. Fotografías de las excavaciones A. Pisos estructurales. B. Algunos objetos ferrosos encontrados en los pisos 1 y 2. C. Restos de cerámicas encontrados en la excavación.

zonas para la excavación arqueológicas (A y B), lo cual representa una orientación racional de estos trabajos en el municipio de Guanabacoa y de esta forma, localizar posibles enterramientos humanos del siglo XVII.

Las anomalías de susceptibilidad magnética en sitios con un alto grado de antropización podrían tener otras fuentes o causas, además de los niveles de pedogénesis, los incendios o quemaduras de suelos o los enterramientos humanos, como la distribución irregular de artefactos cerámicos o ferrosos en el área bajo estudio.

Muestras	Media [10 ⁻⁶ SI]	Desviación Típica
Cóncava	2.58	0.17
Convexa	2.13	0.02
Serpentinita	5.28	0.20

Tabla 5. Valores de la media y desviación típica de las muestras de fragmentos de vasijas de cerámicas y roca serpentinita.

Los trabajos futuros de excavación arqueológica arrojarán más luz sobre la veracidad de los modelos propuestos. Se recomienda la aplicación a las muestras extraídas de cerámicas y rocas de otras técnicas de laboratorio no magnéticas (microscopía electrónica y óptica, espectroscopia Mössbauer, difracción de rayos x, análisis químicos, etc.) y magnéticas que pueden ayudar a investigar la composición magnética, los tamaños de los granos, así como la procedencia de los cerámicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Gabinete de Arqueología de la Oficina del Historiador de la Ciudad en La Habana, por el apoyo durante el levantamiento geofísico y al Dr.c Manuel Enrique Pardo Echarte, por la exhaustiva y rigurosa revisión del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argote Espino, D. L., 2002, Caracterización geofísica de sitios arqueológicos: medio rural y urbano. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias (Ex-

ploración). Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Sitio: https://www.academia.edu/11594528/Caracterizaci%C3%B3n_Geof%C3%ADsica_de_Sitios_Arqueol%C3%B3gicos_medio_rural_y_urbano (Consultado sep/2019).

Bigman, D., 2014, Mapping social relationships: geophysical survey of a nineteenth-century American slave cemetery. *Archaeol Anthropol Sci* (2014) 6:17–30. DOI 10.1007/s12520-013-0119-6.

Binder P. V.; Ataliva V., 2012, Indicios en la tierra: Inhumaciones y fosfatos. Una experiencia en Tucumán (Argentina). *Comechingonia. Revista de Arqueología*, Número 16, primer semestre 2012, pp. 167-184, Córdoba. ISSN 0326-7911. Sitio: https://www.academia.edu/4129445/Indicios_en_la_tierra_inhumaciones_y_fosfatos._Una_experiencia_en_Tucumán_Argentina_. (Consultado oct/2019).

Blanch Puertes L., 2016, Una nueva perspectiva del cartografiado del subsuelo para Restauración y Conservación del Patrimonio Histórico: Modelización y Catalogación de Registros de Georradar en Edificios Singulares Religiosos. Tesis Doctoral. Valencia, enero 2016. Sitio: <https://riunet.upv.es/handle/10251/61297> (Consultado sep/2019).

Crespo Díez M., Rodríguez Marcos J., A., Delibes de Castro G., Becker H., 2015, Prospección magnética en el recinto de fosos calcolítico de «el casetón de la era» (Villalba de los alcores, Valladolid): representación gráfica e interpretación. *Arqueología. BSAA Arqueología*, LXXXI, 2015, pp. 55-84. ISSN: 1888-976X. Universidad de Valladolid.

Dalan R.A., De Vore S.L., Clay R.B., 2010, Geophysical identification of unmarked historic graves. *Geoarchaeology* 25:572–601.

Díaz Vázquez, M., 1993, Aplicación de métodos físico-químicos en arqueología. *Espacio, Tiempo y Forma, Serie I, Prehistoria y Arqueología*, t. 6, págs. 249-262. Sitio: <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv.php?pid=bibliuned:ETFSerie1-127F9A90-1503-F75A-00A1-1AA716B9AA63&dsID=Documento.pdf> (Consultado sep/2019).

- Graham I.**, 1976, The investigation of the magnetic properties of archaeological sediments. *Geoarchaeology*. London, Duckworth, págs. 49-63.
- Iglesias-Santamarina I.**, 2019. Modelización de la descomposición térmica de fosfatos metálicos. Tesis doctoral. Programa de Doctorado de Materiales. Universidad de Oviedo. Sitio: <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/1884>. (Consultado: sep/2019).
- Larrúa-Guédés, S.**, 2014, Floridanos en Cuba, hispano-cubanos en La Florida. Sitio:<http://www.elmonarquico.com/texto-diario/mostrar/416365/floridanos-cuba-hispano-cubanos-florida> (Consultado: sep/2019).
- Linford N.T.**, 2004, Magnetic ghosts: mineral magnetic measurements on Roman and Anglo-Saxon graves. *Archaeol Prospect* 11:167–180.
- Molina Gallego C. M.**, 2016, Metodología para la búsqueda de fosas a partir de la interpretación de anomalías en los datos obtenidos mediante la aplicación geofísica de alta resolución. Tesis presentada como requisito para optar al título de: Doctor en Geociencias. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias. Bogotá, D. C. Colombia. Sitio: <http://bdigital.unal.edu.co/52016/1/79404068>. 2016.pdf. (Consultado oct/2019).
- Mullins C. E.**, 1974, The magnetic properties of the soil their application to archaeological prospecting. *Archaeo-Physika*, 5: 143-7. https://www.academia.edu/3318697/MAGNETIC_SUSCEPTIBILITY_OF_THE_SOIL_AND_ITS_SIGNIFICANCE_IN_SOIL_SCIENCE_A_REVIEW. (Consultado sep/2019).
- Pardo, M, E., O. Rodríguez**, 2005, Algoritmo para determinar el Nivel de Fondo de Atributos con Estructura de Datos Secuenciales Lineales en La Tecnología Redox. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*. vol. 99.
- Pérez Martínez N., Sacasas León C., Cuevas Ojeda J. L., Pérez Lazo J., Fundora Granda M. J., Pérez A., Lufriú L., Rodríguez B., Prol Betancourt J. L., González Caraballo R., Olivera J.**, 1996, Metodología geofísica para la búsqueda de sitios de enterramientos humanos, no arqueológicos, de más de una década. Sitio: <http://busquedarestosche.cubasi.cu/fichas/geofisicos.pdf> (Consultado sep/2019).
- Pringle J.K., M. Giubertoni, N.J. Cassidy, K. Wisniewski, J.D. Hansen, N. Linford, R. Daniels**, 2015, The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool, *Forensic Sci. Int.* 246 (2015) 31–42.
- Reynolds, J. M.**, 2011, An introduction to applied and environmental geophysics, 2nd ed., Wiley. [http://lib.iszf.irk.ru/An%20Introduction%20to%20Applied%20and%20Environmental%20Geophysics-Wiley%20\(2011\).pdf](http://lib.iszf.irk.ru/An%20Introduction%20to%20Applied%20and%20Environmental%20Geophysics-Wiley%20(2011).pdf) (Consultado sep/2019).
- Roura Álvarez L., Arrazcaeta Delgado R., Domínguez González I. S., Carr R. S.**, 2019, Indios naturales y floridanos en Guanabacoa. Proyecto de investigación arqueológica con excavación. Gabinete de arqueología. Oficina del historiador de La Habana.
- Scollar I.**, 1965, A contribution to magnetic prospecting in archaeology. *Archaeo-Physika* 1: 21-92. [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/\(SICI\)1520-6548\(199801\)13:1<3::AIDGEA_2>3.0.CO;2-9](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/(SICI)1520-6548(199801)13:1<3::AIDGEA_2>3.0.CO;2-9) (Consultado sep/2019).
- Spiegel M. R.**, 1971, Teoría y problemas de estadística. Editora Ciencia y Técnica. Instituto Cubano del Libro.
- Vázquez Castro G., Solís Castillo B.**, 2018, Magnetismo ambiental y cambio climático. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Sitio: http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/Magnetis-mo_ambiental_y_cambio_climatico.pdf (Consultado sep/2019).

Fecha de recepción: 20 de marzo de 2020
Fecha de arbitraje: 22 de marzo de 2020
Fecha de aprobación: 11 de julio de 2020

Uso del Georradar en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión. Caso de estudio: Malecón habanero, Cuba.

Ernesto Alejandro Hernández Martín¹, Javier Ballote Álvarez² y Orlando R. Carraz Hernández³

¹ Ingeniero geofísico. Departamento de Geofísica Espacial. Instituto de Geofísica y Astronomía, Calle 212 # 2906 /29 y 31, Reparto La Coronela, La Lisa, La Habana, Cuba. Correo electrónico: ernestohm96@gmail.com.

² Ingeniero geofísico. Departamento de Geociencias. Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», Calle 114 # 11901 /ciclo vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: jballote@civil.cujae.edu.cu.

³ Ingeniero geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Departamento de Geociencias. Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», Calle 114 # 11901 /ciclo vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba. Correo electrónico: orlando@civil.cujae.edu.cu.

RESUMEN

El método geofísico del Georradar (*Ground Penetrating Radar* (GPR)), se aplica en el ámbito de la ingeniería civil de distintas formas; una de ellas es la evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión. En esta investigación se abordan las características esenciales que hacen útil la aplicación del GPR por encima de otros ensayos no destructivos (END) en este tipo de estructuras y se presenta las diferentes respuestas electromagnéticas que brinda el georradar ante diversas patologías, como oquedades, zonas de humedad y la propia corrosión. A su vez se pudieron conocer los parámetros de adquisición más utilizados en el georradar para identificar estas respuestas. Como objeto de estudio se tomó un sector del muro del malecón habanero que se encuentra afectado por la corrosión. A través del programa informático *GPR Simulation Software* (GPR-SIM) se elaboraron modelos sencillos para conocer la respuesta electromagnética de la señal del GPR ante la corrosión del hormigón armado en distintas situaciones. Se definieron las posibles patologías presentes en

la estructura, para apreciar si estas se distinguen en la señal resultante del radargrama con los parámetros de adquisición definidos. A partir de estos, se confeccionaron modelos más complejos que se asemejan a las condiciones actuales del sector del muro del malecón habanero, con el objetivo de diseñar el sistema de adquisición óptimo mediante GPR que permita evaluar de forma eficaz su estado técnico. Como resultado se propone una variante de adquisición que emplea una antena de 1.6 GHz, una ventana de tiempo de 20 ns, 500 *scan/m* y 512 muestras.

Palabras claves: Georradar, hormigón armado, corrosión, malecón habanero, GPR-SIM.

ABSTRACT

The geophysical method of Georradar (*Ground Penetrating Radar* (GPR)) is applied in the field of civil engineering in different ways; one of them is the evaluation of the technical state of the reinforced concrete structures affected by corrosion. In this research, the essential characteristics that make the application

of the GPR useful over other non-destructive tests (NDT) in this type of structures are addressed and the different electromagnetic responses provided by the georadar are presented in the face of various pathologies, such as cavities, areas of moisture and corrosion itself. At the same time, it was possible to know the acquisition parameters most used in the georadar to identify these responses. As an object of study, a sector of the wall of the Havana seawall that is affected by corrosion was taken. Using the GPR Simulation Software (GPR-SIM) computer program, simple models were developed to determine the electromagnetic response of the GPR signal to the corrosion of reinforced concrete in different situations. The possible pathologies present in the structure were defined, to see if they are distinguished in the signal resulting from the radargram with the defined acquisition parameters. From these, more complex models that resemble the current conditions of the sector of the Havana seawall were made, with the aim of designing the optimal acquisition system through GPR that allows an efficient evaluation of its technical state. As a result, an acquisition variant is proposed that uses a 1.6 GHz antenna, a time window of 20 ns, 500 scan/m and 512 samples.

Keywords: Ground Penetrating Radar, reinforced concrete, corrosion, Havana seawall, GPR-SIM.

RESUMO

O método geofísico de Georradar (*Ground Penetrating Radar*, (GPR)) é aplicado na área da engenharia civil de diferentes formas; uma delas é a avaliação do estado técnico das estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão. Nesta pesquisa, são abordadas as características essenciais que tornam a aplicação do GPR útil sobre outros ensaios não destrutivos (END) neste tipo de estruturas e são apresentadas as diferentes respostas eletromagnéticas proporcionadas pelo georadar face a várias patologias, tais como cavidades, áreas de umidade e a própria corrosão. Ao mesmo tempo, foi possível conhecer os parâmetros de aquisição mais utilizados no georadar para identificar essas respostas. Como objeto de estudo, foi tomado

um setor da parede do paredão de Havana que está afetado pela corrosão. Através do programa de computador GPR Simulation Software (GPR-SIM), modelos simples foram desenvolvidos para determinar a resposta eletromagnética do sinal GPR à corrosão do concreto armado em diferentes situações. Foram definidas as possíveis patologias presentes na estrutura, para verificar se estas se distinguem no sinal resultante do radargrama com os parâmetros de aquisição definidos. A partir destes, foram feitos modelos mais complexos que se assemelham às condições atuais do setor do muro de Havana Malecón, com o objetivo de desenhar o sistema de aquisição ideal através de GPR que permita uma avaliação eficiente de seu estado técnico. Como resultado, é proposta uma variante de aquisição que usa uma antena de 1,6 GHz, uma janela de tempo de 20 ns, 500 scan/m e 512 amostras.

Palavras chaves: Georadar, concreto reforçado, corrosão, paredão de Havana, GPR-SIM.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción a través de la historia por su versatilidad y bajo costo. El hormigón armado surge de la combinación de hormigón y de acero estructural; se utiliza en construcción de puentes, edificios, túneles, entre otras estructuras (Höla *et al.*, 2015). La combinación de la alta resistencia a la compresión que ofrece el hormigón y las excelentes propiedades mecánicas del acero hacen de este, el material compuesto ideal para aplicaciones estructurales. Una de las características más importantes del hormigón, además de sus propiedades mecánicas, es su durabilidad, la cual se asocia con la vida útil en servicio de una estructura, una vez expuesta a determinadas condiciones o ambientes.

Sin embargo, las estructuras de hormigón armado pueden estar expuestas durante su vida útil al ataque químico y físico de diversos agentes que producen daños y deterioros de las mismas, entre estas están el viento, la lluvia, los asentamientos, los sismos, incluso por el uso cotidiano. Debido a lo antes ex-

puesto, la durabilidad del hormigón variará de acuerdo con la condición de exposición y a los servicios a la que se verá sometida la estructura durante su vida útil. El hormigón se deteriora por varias razones y en muchas ocasiones los daños es el resultado de una combinación de factores, al comenzar con la formación de grietas que conducen a procesos que implican reacciones químicas perjudiciales y desajuste hidrostático.

Como regla, en la práctica se producen combinaciones de los diferentes mecanismos, en forma de procesos de degradación complejos que causan daños a la estructura y en última instancia, determinan su vida útil (Höla *et al.*, 2015). Uno de los mayores problemas que afecta la vida útil del hormigón es la corrosión del acero de refuerzo. La corrosión del acero de refuerzo consiste en la oxidación destructiva del acero cuando el hormigón se encuentra expuesto a ambientes agresivos, en especial frente a la exposición a iones cloruros y/o dióxido de carbono. Las consecuencias de la acción destructiva de la oxidación se presentan como una disminución de la sección del acero, fisuramiento en el hormigón e incluso laminación del mismo, debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo y a la disminución o desaparición de la adherencia entre el refuerzo y el hormigón (Aguirre y Mejía de Gutiérrez, 2013).

Es necesario realizar estudios de inspección y evaluación, para determinar la existencia de patologías o lesiones en las estructuras, para luego ejecutar medidas preventivas o de reparación (Barreto y Ganzhi, 2018). El hormigón armado es un material poroso, por lo que es permeable y penetrable. Su resistencia dependerá tanto de las propiedades del material, como de su aplicación y su exposición al medio ambiente. Para la evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado existen ensayos o técnicas denominados destructivos y no destructivos. Dentro de los destructivos se encuentran: extracción y rotura de probetas testigo de hormigón y toma de muestras de armaduras (Porto, 2005). Ejemplos de ensayos no destructivos son: Ensayos Ultrasonicos, Corrosímetro, Resistividad Eléctrica, Termografía Infrarroja, Métodos Radioactivos y el Georradar.

Cuba es un archipiélago estrecho y alargado, presenta un clima tropical con una humedad relativa alta. Al estar rodeado en su totalidad de mar, es afectado por la acción constante de los aerosoles marinos por lo que las estructuras en el litoral costero como los malecones son las más afectadas por estos procesos. El malecón habanero, como parte del Plan del Estado cubano para el enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida), comenzará un proceso de rehabilitación del muro del malecón habanero para evitar las reiteradas inundaciones costeras. Para ello, es necesario identificar los tipos de daños causados por la corrosión y las zonas más afectadas de manera rápida y no destructiva, de forma tal que se racionalicen los recursos materiales y humanos de esta millonaria inversión. Este artículo propone como objetivo obtener un sistema de adquisición de datos mediante el GPR que permita realizar la evaluación estructural de un sector del muro del malecón habanero. La elaboración del mismo es con fines educativos.

Para la evaluación del estado técnico de las estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión, existe un conjunto de técnicas y procedimientos no destructivos que permiten determinar el grado de afectación. El Georradar o *Ground Penetrating Radar* (GPR, por sus siglas en idioma inglés), es un método no destructivo que se maneja con regularidad en los estudios de corrosión. La técnica del georradar se utiliza en función de determinar el espesor del hormigón (Kim *et al.*, 2003; Istiaque y Yazdani, 2014), identificar fracturas y oquedades (Morris *et al.*, 2019; Solla *et al.*, 2019), detectar los aceros (Beben *et al.*, 2013; Amran *et al.*, 2017), definir zonas de humedad (Istiaque y Yazdani, 2014) y determinar el espesor del hormigón (Kim *et al.*, 2003; Istiaque y Yazdani, 2014). La identificación de la corrosión se realiza a partir de la coincidencia de las zonas de humedad con la ubicación de los aceros y se definen estos sectores como los más probables para el desarrollo de la corrosión (Kim *et al.*, 2003; Dinh *et al.*, 2013). Otra forma es mediante el análisis de cada acero y observar los cambios en la amplitud de la señal del equipo a medida que se mide (Lai *et al.*, 2013; Krishnarajapete, 2015; Zaki *et al.*,

2018). Los cambios de amplitud en el acero aportan información sobre el cambio de las propiedades electromagnéticas del mismo, debido a la corrosión. Otra forma de medir la corrosión sobre la estructura, es apoyarse en otros métodos como el HCP; donde se calibra la amplitud de la señal del georradar con el nivel de corrosión sobre un acero dado por el HCP y luego se realizan las mediciones de georradar al resto de la estructura (Kabir y Zaki, 2011; Lai *et al.*, 2013).

Las antenas de mayor frecuencia (1.5-2.6 GHz) ofrecen una mejor resolución para detectar los aceros, determinar su radio y evaluar el grado de corrosión de las estructuras de hormigón armado (Lai *et al.*, 2013; Lakshmi y Rahamath, 2016; Solla *et al.*, 2019). Las antenas con frecuencia menor (400-900 MHz) ofrecen una resolución inferior, su utilidad se basa en la detección de los aceros, en dependencia del espesor y la separación de los mismos, en estudios de pavimentos, túneles y para determinar el espesor del hormigón (Xiang *et al.*, 2013; Saricicek y Seren, 2014; Prego *et al.*, 2016); su principal ventaja es que suelen estar montadas sobre ruedas de mayor tamaño, lo que hace más rápido la adquisición de los datos. Ambas antenas permiten detectar oquedades, zonas de agrietamientos y humedad. La elección de un tipo u otro de antena dependerá de la estructura a investigar, del tipo de información que se desea obtener, así como de la profundidad de la investigación. En cuanto al sistema de adquisición, el A-scan es el menos empleado y se usa con antenas de alta frecuencia en los ensayos o pruebas de laboratorio de manera puntual (Lai *et al.*, 2013; Zaki *et al.*, 2018; Solla *et al.*, 2019; Sossa *et al.*, 2019). El objetivo de su uso es determinar la variación en el tiempo de la amplitud y los picos de frecuencia de la onda directa y reflejada, que son indicadores de los cambios en las propiedades electromagnéticas del medio. El B-scan constituye la forma de adquisición más común, por su rapidez y versatilidad (Kim *et al.*, 2003; Dinh *et al.*, 2013; Xiang *et al.*, 2013) al aplicarse sobre cualquier tipo de estructura y permite realizar un A-scan al tomar una traza del radargrama o simular un C-scan mediante perfiles paralelos y perpendiculares. El tipo C-scan es el idóneo para conocer la distribu-

ción de los aceros, se suele aplicar en pequeñas áreas donde se desea obtener toda la información posible, el tiempo de adquisición de los datos con el C-scan es mayor, pero la calidad de la información aumenta (Cassidy *et al.*, 2011; Kabir y Zaki, 2011).

Los ensayos experimentales sobre muestras de hormigón han revelado dos tendencias por parte de los investigadores; una es, a interpretar la corrosión con el aumento de la amplitud (Kabir y Zaki, 2011; Lai *et al.*, 2013; Hong *et al.*, 2014; Lai *et al.*, 2017; Tosti y Ferrante 2019; Wong *et al.*, 2019) y otra es, con la disminución de la amplitud (Zaki *et al.*, 2018; Solla *et al.*, 2019; Sossa *et al.*, 2019). Como se mencionó anteriormente, aun cuando no se hayan definido los umbrales, en la actualidad se acepta el criterio de que la baja intensidad corresponde a la fase inicial de corrosión y la alta intensidad con la fase activa de corrosión.

Durante la adquisición en el terreno, se define el objetivo a cumplir y el nivel de precisión de cada trabajo, se toman distintos parámetros. La cantidad de muestras por scan que se utiliza son de 512 (Xiang *et al.*, 2013; Prego *et al.*, 2016). En cuanto a la ventana de tiempo varían según la profundidad de cada estudio y la frecuencia de la antena, para profundidades someras y con antenas de frecuencias mayores de 1 GHz la ventana de tiempo varía entre 10 ns y 20 ns (Kim *et al.*, 2003; Hugenschmidt y Kalogeropoulos, 2009; Solla *et al.*, 2019), mientras que si se plantea estudiar a mayor profundidad con frecuencias menores los valores de la ventana de tiempo es mayor, entre 20 ns y 40 ns (Hugenschmidt y Kalogeropoulos, 2009; Cassidy *et al.*, 2011; Prego *et al.*, 2016).

MATERIALES Y MÉTODOS

El Georradar es un método de investigación geofísica basado en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (entre 1 ns y 10 ns), en la banda de frecuencias de UHF-VHF (entre 8 MHz y 2.6 GHz). La técnica de georradar se basa en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio (Pellicer, 2014). La energía de los pulsos reflejados se mide sobre la superficie mediante dispositivos receptores (**Figura 1**) y como resultado

se obtiene una imagen del medio denominada radargrama (B-scan) (Bonomo y de la Vega, 2006).

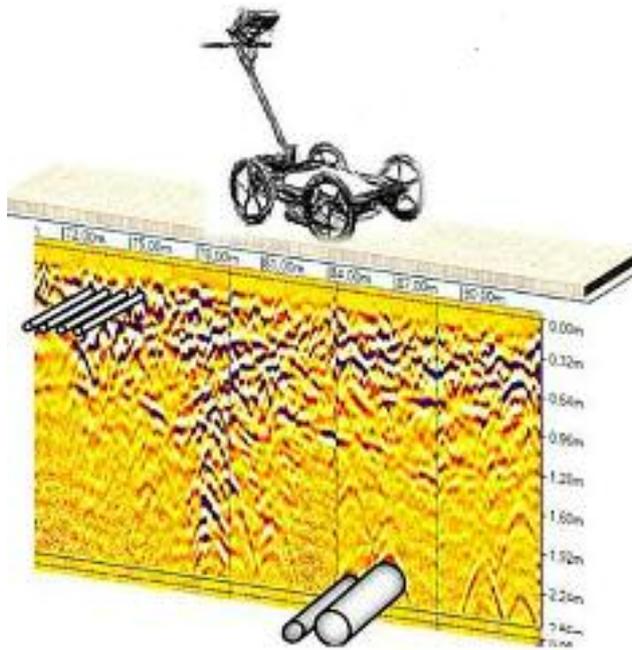


Figura 1. Ejemplo de Georradar y radargrama resultante. Tomada de Esteve (2005).

La eficacia de esta técnica depende en gran medida de si las superficies de interés tienen suficiente contraste dieléctrico como para producir reflexiones.

Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío a la velocidad de la luz ($c=2.998 \times 10^8$ m/s), los componentes del campo eléctricos y del magnéticos están en fase, siempre perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de la onda.

La velocidad de propagación de la onda (v) se calcula de forma sencilla en los casos en los que es posible una aproximación de pequeñas pérdidas ya que el término asociado con la conductividad (σ) tiende a cero, esto ocurre cuando los medios por los que se propaga la señal son dieléctricos casi perfectos. que son la mayoría de los materiales que se estudian habitualmente. A su vez, si el medio es no magnético, como también sucede en la mayoría de los casos, la permeabilidad magnética (μ) tiende a la unidad. Bajo estas condiciones, la velocidad se estima a través de la **Ecuación 1**, que depende de la velocidad de la luz en el

vacío ($c=2.998 \times 10^8$ m/s) y de la constante dieléctrica relativa del medio (ϵ_r) (González, 2013) (**Ecuación 1**).

$$V_m = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/ns} \quad (1)$$

Durante la propagación de una onda electromagnética por un medio se producen pérdidas de energía debido a diferentes causas. Esta disminución de la amplitud de la onda determina la profundidad máxima teórica que se podrá alcanzar en cada caso. Otros efectos tales como una mala relación señal/ruido, problemas con los equipos o un tratamiento incorrecto, harán que este valor sea, en la práctica, todavía menor que el esperado (Pellicer, 2014).

La disminución de energía es consecuencia de las pérdidas producidas en la reflexión y refracción en cada una de las interfaces electromagnéticas que atraviese la onda. Otra causa es la dispersión geométrica del frente de ondas, como la onda se propaga para cubrir un área cada vez mayor, el principio de conservación de la energía exige que la amplitud de la misma decrezca. El valor de la longitud de onda influye de forma drástica en la pérdida y dispersión de la energía.

Una forma muy común de caracterizar a las antenas es por la frecuencia central de su emisión. La longitud de onda del pulso emitido depende de esta frecuencia y de la velocidad de onda en el medio a través de la **Ecuación 2**:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2)$$

Donde: λ es la longitud de onda, V es la velocidad de la onda y f es la frecuencia.

A medida que mayor sea la frecuencia de emisión, la onda sufre una mayor atenuación en su propagación. Hay que tener en cuenta el fin con que se lleva a cabo cada investigación, para definir la frecuencia a utilizar. Así, mientras que se trabaje con antenas de baja frecuencia (<100 MHz) aumenta la capacidad de penetración (>9 metros), pero una escasa resolución. Por otra parte, para estudiar zonas de poca profundidad

se utilizan las antenas de alta frecuencia, estas permiten distinguir objetos de muy pequeño tamaño con alta resolución.

La profundidad de penetración (D), se estima a partir de la velocidad medio V_m (**Ecuación 1**) y el tiempo doble de propagación resultado del análisis de radargramas. Bajo estas premisas la profundidad resulta (**Ecuación 3**):

$$D = \frac{T * V_m}{2} \quad (3)$$

Por lo general, durante la adquisición de los datos, los parámetros se definen de forma correcta para obtener unos datos con calidad, siempre y cuando estar pendiente de la tarea técnica que se quiere resolver y la antena con que se trabaje. Los parámetros a considerar son: frecuencia, ventana de tiempo (TWT), cantidad de muestras (*samples*), *scan*/unidad y ganancia.

La ventana de tiempo es el intervalo temporal de medición en el que se suelta el tren de impulsos. Mientras se tome un menor tiempo, el equipo va a trabajar con los reflectores más someros; si se aumenta el rango de tiempo, se podrá trabajar con reflectores más profundos. El rango tiempo está en el orden de los nanosegundos (ns). Este parámetro está relacionado con el intervalo de muestreo; cuanto mayor sea la ventana temporal de registro, mayor debería ser el número de puntos por traza.

Scan/unidad de distancia (*scan*/m): Determina la cantidad de *scan* por unidad de distancia horizontal. Cuanto menor es el espaciado entre *scan*, lo que se traduce en mayores valores de *scan*/m, más alta será la resolución horizontal, pero mayor es el archivo informático generado y mayores son los tiempos de adquisición de los datos. Se mide tanto en *scan*/m como por distancia.

Ganancia: La aplicación de la ganancia consiste en amplificar la señal que se recibe y su objetivo es contrarrestar los efectos de atenuación que se producen. Se lleva a cabo durante la adquisición de datos o durante el procesamiento posterior.

El programa informático *Ground Penetrating Radar Simulation Software* GPR-SIM (Goodman, 1994),

fue donado bajo licencia al Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» (CUJAE) por *Geophysical Archeometry Laboratory* con fines educativos. El mismo permite realizar los cálculos al utilizar la ondulada *damped sine* y el método de trazado de rayos. Según Goodman (2020), el método de trazado de rayos que utiliza el GPR-SIM, en términos de «error de modelado», presenta algunas deficiencias pues no analiza los rayos difractados ni la interferencia destructiva/constructiva de la onda reflejada. Consiste en enviar ondas a un modelo y buscar los rebotes producto de la reflexión, transmisión, refracción y atenuación a lo largo del trayecto de los rayos. A pesar de sus limitaciones el GPR-SIM es eficaz para determinar firmas generalizadas del georradar y no existe una discusión formal sobre los errores asociados con el simulador. Existen otros programas, como el GPRMAX que permiten realizar un modelado de ondas complejo.

Corrosión en el hormigón armado

La corrosión del hormigón armado es una de las causas más comunes de deterioro en este material (Howland *et al.*, 2014; Alla, 2016). Se define que la corrosión es el deterioro de un material o de alguna de sus propiedades, causado por la reacción con el medio que lo rodea. Esta definición permite incluir a todos los materiales, cualquiera sea el mecanismo de degradación que los afecte (Avenidaño, 2006). La corrosión ocurre cuando se altera la protección de hormigón que le corresponde a cada estructura, al formarse una capa que pasiva la interfaz hormigón-acero.

El hormigón ofrece protección contra la corrosión al acero de refuerzo, debido a que el oxígeno presente dentro de este material, forma una película de óxido en las barras, que constituye una capa pasiva que impide una corrosión profunda. El carácter básico y la resistividad eléctrica del hormigón que recubre el acero, evitan la penetración de agentes agresivos. La principal causa de la corrosión del acero de refuerzo es la disminución de la alcalinidad del hormigón que se encuentra expuesto a sustancias agresivas del medio ambiente, como son los cloruros y los ácidos (Aven-

daño, 2006). Los procesos de corrosión son provocados por el fenómeno de difusión, en los poros del hormigón, de sustancias como el oxígeno, dióxido de carbono o los iones cloruro, que, combinados con la humedad ambiental, aceleran el deterioro del acero. Un hormigón fabricado con una alta relación agua-cemento (A/C), una mala compactación, segregación de la mezcla, un deficiente curado y un secado prematuro por efectos del viento o la radiación solar, se convierte en un hormigón con alta porosidad y permeabilidad en la zona del recubrimiento, que facilita el ingreso de sustancias agresivas que corroen las armaduras y deterioran el elemento estructural.

El malecón habanero

Los malecones son estructuras que buscan resguardar un puerto o la costa de los embates de las olas. Se construyen como mecanismo defensivo ante el avance del agua y por lo general, es un rompeolas, un dique que se introduce en el mar. El malecón de La Habana, en Cuba, es la avenida marítima más famosa del país. Esta avenida que dispone de seis carriles y está protegida por un muro, con una longitud de ocho kilómetros, en la zona norte de la capital cubana. El malecón habanero empezó a erigirse en 1901, con los años se extendió hasta alcanzar su fisonomía actual; su construcción fue dividida en 6 sectores y tomó alrededor de 60 años (Bianchi, 2016). Esta estructura, por su ubicación, ha sido abatido por los constantes avatares me-

teorológicos; los aerosoles marinos y debido a la falta de constancia en su mantenimiento, provocaron el resquebrajamiento de algunas franjas del muro y aceras (Puga *et al.*, 2006).

De todo el malecón habanero se eligió la zona entre las calles B y C para ser estudiada por ser el sector que presenta mayor información documental y visual sobre la ubicación de los aceros. En conjunto, con las fotos de archivo brindadas por la Empresa de Servicios Ingenieros Hidráulicos Occidente (ESIHO) (Figura 2) y con la inspección visual llevada a cabo por los autores se obtuvo información sobre diferentes parámetros técnicos, como son el espaciamiento entre los aceros y la profundidad aproximada a la que están ubicados.

Según las fotografías y la inspección visual, existen tres niveles de aceros que se extienden longitudinalmente; un primer nivel, con tres aceros a 20 cm de profundidad; el segundo nivel, con dos aceros a 60 cm de profundidad y el tercer nivel, a alrededor de un metro de profundidad, ubicado al mismo de la acera. Por otra parte, por cada nivel horizontal, están ubicados otros aceros perpendiculares a estos, los cuales se encuentran espaciados entre ellos a 40 cm. Igual, en el segundo nivel horizontal, están ubicados aceros perpendiculares a 40 cm de espaciamiento entre ellos e intercalados con los primeros. Por último, en el tercer nivel horizontal existen aceros perpendiculares, pero se desconoce el distanciamiento entre cada uno (Figura 3).

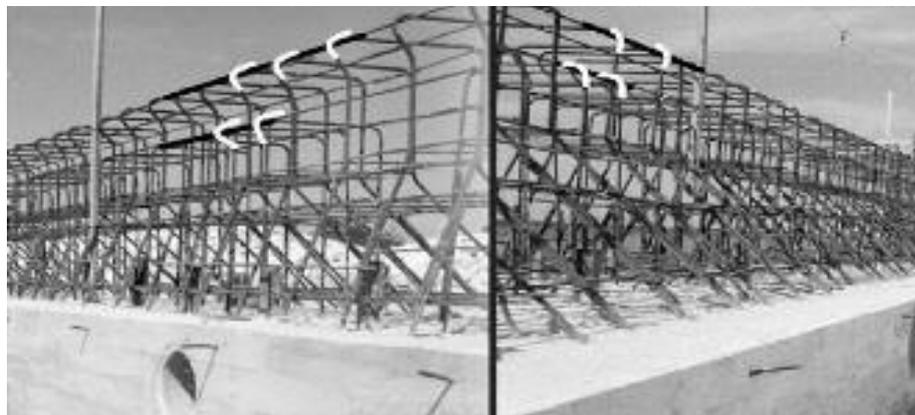


Figura 2. Construcción del sector del muro del malecón habanero entre las calles B y C. Se distingue la ubicación de los aceros en sus tres niveles (Modificado de Empresa de Servicios Ingenieros Hidráulicos Occidente (ESIHO)).



Figura 3. Aceros corroídos que se pueden detectar a simple vista en el sector de estudio (Tomada por el autor).

RESULTADOS

Con el objetivo de determinar los parámetros de adquisición idóneos con el georradar, que permitan el estado técnico del caso de estudio, se realizó una serie de modelaciones en el programa informático GPR-SIM. Se trata de modelos sencillos, que usan los parámetros de adquisición más utilizados en investigaciones afines. Se desarrollaron un total de 6 modelos semejantes a las posibles situaciones que se puedan presentar durante la toma de datos; el objetivo es disminuir la ambigüedad que existe en torno a la tarea inversa de toda investigación geofísica y diseñar el sistema óptimo de adquisición.

En el modelo 1 (**Figura 4A**) se empleó una antena de 1.6 GHz, 100 scan/m, una ventana de tiempo de 10 ns y 512 muestras, que son parámetros acordes a las características del modelo y a lo visto en la in-

vestigación bibliográfica en la losa de hormigón hay un acero sin corroer y una oquedad de igual radio y a la misma profundidad. Como resultado se observa que el contraste existente entre el hormigón y el acero (izquierda), presenta mayor amplitud que el hormigón-aire (derecha). En este caso, la diferencia en las amplitudes se basa en mayor medida a la conductividad eléctrica y a la permeabilidad magnética, pues presentan los mismos valores de permitividad dieléctrica ($\epsilon_r = 1$). También se observa un cambio de polaridad entre las amplitudes, característico de las oquedades.

Como el caso de estudio se trata de un malecón, el cual está en constante contacto directo con el agua de mar y salpicaduras de las olas, se elaboró el modelo 2 (**Figura 4B**), el cual considera una mitad del hormigón seco y la otra mitad húmedo, para ver los cambios en la señal de georradar a partir de las varia-

ciones en las propiedades electromagnéticas del medio. Embebido en esta losa, en la zona seca, se encuentra un acero sin corroer y en la zona húmeda, un acero corroído. Como resultado se obtuvo la hipérbola resultante del contraste hormigón seco-acero sin corroer, pero en el caso del hormigón húmedo, no se pudo observar la hipérbola resultante del acero corroído. En zonas húmedas, ocurre una mayor atenuación de la señal, la onda pierde intensidad y aumenta su tiempo de viaje. Eso se detecta en el desglose de las ondas, donde se observa un retardo de la onda reflejada.

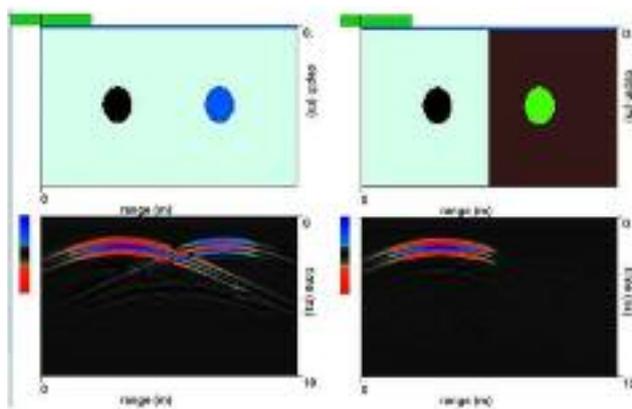


Figura 4A Modelo 1: Acero sin corroer (izquierda) y oquedad (derecha) en el hormigón. Tomada de GPR-SIM (2020). B Modelo 2: Hormigón seco con acero embebido sin corroer (izquierda) y hormigón húmedo con acero corroído (derecha). Tomada de GPR-SIM

Para el modelo 3 (**Figura 5**), se tomaron las mismas características del modelo 2, pero se sustituyó el acero corroído en el hormigón húmedo ($\epsilon_r = 15$), por uno sin corroer, debido a que, en ocasiones, sin la acción del oxígeno y el dióxido de carbono, la capa pasivante del acero hace que no se produzca la corrosión, aun cuando esté bajo la acción del agua. Como resultado, en la **Figura 5A**, se observa una disminución considerable en la amplitud del acero sin corroer en el hormigón húmedo.

Al aumentar la ganancia para amplificar la relación señal/ruido (**Figura 5B**), se aprecia una ligera mejoría en el radargrama, lo que permite identificar una pequeña hipérbola sobre el acero, aunque también se resalte el contacto aire-hormigón de la superficie. No obstante, el acero sin corroer embebido en el hormigón

húmedo (**Figura 5A**) se logra distinguir mejor que el acero corroído en igual medio (**Figura 4B**) por los mayores contrastes de permitividad dieléctrica existentes entre el hormigón húmedo ($\epsilon_r = 15$) y el acero sin corroer ($\epsilon_r = 1$), mientras que el acero corroído presenta una permitividad dieléctrica de ($\epsilon_r = 12$), que hace que su coeficiente de reflexión sea menor que en el primer caso. Para identificar aceros embebidos en el hormigón húmedo, incluso aceros sin corroer, resulta de extrema complejidad obtenerlo en un análisis primario. Durante el procesamiento se mejoran las técnicas y filtros a aplicar, de manera tal que se pueda resaltar la señal útil.

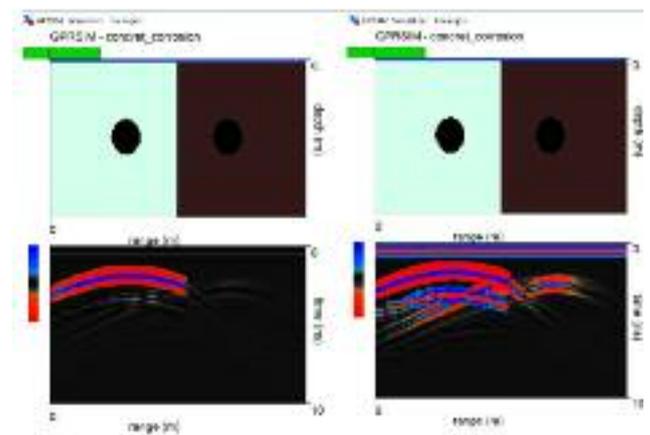


Figure 5. Modelo 3 A Hormigón seco con acero embebido sin corroer (izquierda) y hormigón húmedo con acero sin corroer (derecha). B Hormigón seco con acero embebido sin corroer (izquierda) y hormigón húmedo con acero sin corroer (derecha), la ganancia aumenta. Tomada de GPR-SIM (2020).

En el modelo 4 (**Figura 6**) se ubicaron dos aceros embebidos en el hormigón ($\epsilon_r = 6$), uno sin corroer ($\epsilon_r = 1$) y otro en fase inicial de corrosión, que presenta escamas a su alrededor con pequeñas oquedades intercaladas con óxido de hierro ($\epsilon_r = 12$), pero en su interior se mantuvo el valor original del acero.

En el radargrama del modelo 4 (**Figura 6A**) se observa la respuesta de los dos aceros, el contraste entre el acero sin corroer-hormigón es el de mayor amplitud. En el caso del acero corroído, se aprecia como en la fase inicial de corrosión hay una disminución de amplitud o «zona borrosa», como lo definen Zaki *et al.*, (2018); Solla *et al.*, (2019); Sossa *et al.* (2019) y

Aclarar que en todos los modelos se eliminó el efecto del *ringing*. En el modelo 5 (**Figura 6B**) se define de igual forma, una losa de hormigón y dos aceros embebidos, uno en perfectas condiciones y otro en un estado crítico de corrosión con zonas de fracturas y laminaciones y su centro se encuentra corroído en su totalidad ($\epsilon_r = 12$). Llama la atención, la aparición de varias hipérbolas con mayor tiempo de viaje de la onda, como resultado del acero con el estado de corrosión. La hipérbola más profunda es la que mayor amplitud presenta. En este caso la aparición de varias hipérbolas con mayor tiempo de viaje de la onda ocurre como resultado del acero con el estado de corrosión. La hipérbola más profunda presenta una mayor amplitud y un cambio de polaridad de la onda.

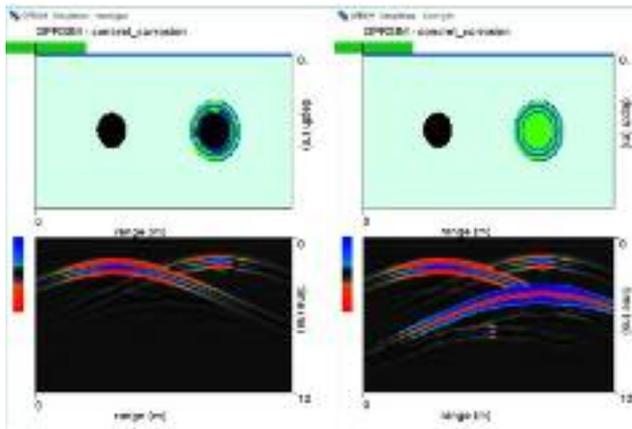


Figura 6. A Modelo 4: Acero sin corroer (izquierda) y acero corroído (derecha) en una losa de hormigón. Tomada de GPR-SIM (2020). B Modelo 5: Acero sin corroer (izquierda) y acero corroído con óxido en el interior y láminas finas óxido intercaladas. Tomada de GPR-SIM (2020).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para un análisis más realista del malecón habanero, se plantearon dos modelos que atienden mejor la distribución de los aceros en el sector de estudio. Se variaron las propiedades electromagnéticas del hormigón y de los aceros, en dependencia del grado de corrosión y de las condiciones ambientales. Se modificaron los valores de frecuencia entre 750 MHz y 1.6 GHz. También se modificó la ventana de tiempo (10-20 y 30 ns), la cantidad de scan/m (400, 500, 750 y 1001) y las

muestras (512 y 1024). A continuación, se detallan los resultados más importantes.

Para el área de estudio se trabajó otros dos posibles modelos, uno (modelo 5, **Figura 7**) con la presencia de un hormigón fracturado ($\epsilon_r = 5$) hasta la mitad de la estructura y en su inferior un hormigón en buen estado ($\epsilon_r = 6$). En el interior del hormigón se ubicaron los aceros, según la información visual y las fotografías obtenidas por el autor. En este modelo se trabajó con aceros con diferentes grados de corrosión; en un primer nivel a 20 cm de profundidad, en la zona del hormigón fracturado, están tres aceros, uno no corroído ($\epsilon_r = 1$), otro acero con presencia de óxido a su alrededor ($\epsilon_r = 1$ y 12) y en el centro, un acero en total corrosión ($\epsilon_r = 12$) con presencia de oquedades a su alrededor ($\epsilon_r = 1$). Luego, a 60 cm, inmersos en el hormigón en buen estado, un segundo nivel de aceros, uno sin corroer y otro presenta un poco de óxido. Por último, a un metro, se encuentra el tercer nivel de aceros, todos sin corrosión.

De forma general, se define que los aceros pueden ser detectados tanto con frecuencia de 750 MHz como con 1.6 GHz, se define que a medida que es mayor la frecuencia mejora la nitidez del radargrama resultante. En los distintos radargramas se definen como la hipérbola de mayor amplitud, el acero sin corroer, mientras que el acero con una capa de óxido presenta una hipérbola «borrosa», respuesta típica en aceros con una temprana corrosión; mientras que en la zona donde está ubicado el acero corroído, los reflectores se definen con claridad y se detecta un cambio en la polaridad de la amplitud, lo que demuestra la presencia de aire alrededor de este acero. En el centro del radargrama hay una línea horizontal que define el contraste existente entre los dos tipos de hormigones, la cual enmascara la señal de los aceros del segundo nivel. En cuanto a los aceros del tercer nivel, en ambas antenas se detectan, pero no con mucha calidad; se distingue un frente de onda debido al poco espaciamiento entre los aceros, que hacen que se vean en los radargramas como si se tratase de un horizonte.

El otro modelo del sector a estudiar (modelo 6, **Figura 8**), se basa en una estructura con tres espe-

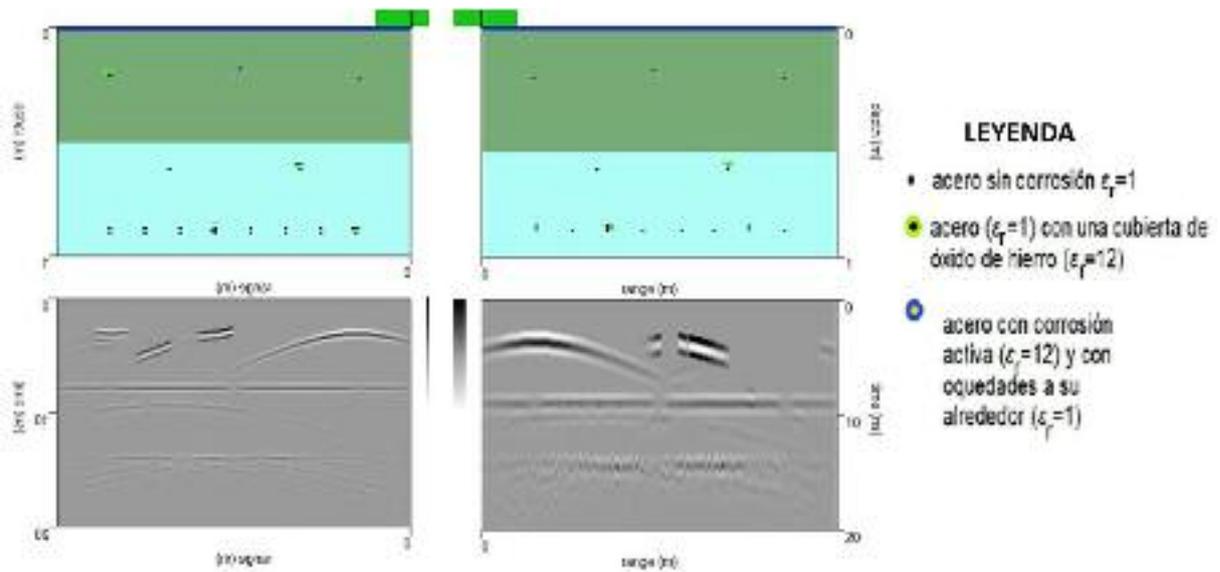


Figura 7. A Modelo 5 del sector de estudio. A. Realizado con una antena de 1.6 GHz, 500 scan/m y un total de 512 muestras. B. Realizado con una frecuencia de 750 MHz 500 scan/m y 512 muestras. Ambos con ganancia 10. Zona verde ($\epsilon_r = 5$) y zona azul ($\epsilon_r = 6$). Tomada de GPR-SIM (2020).

sores de hormigón con distintas características; una primera capa con hormigón fracturado ($\epsilon_r = 5$), una segunda capa con hormigón húmedo ($\epsilon_r = 15$) y por último, un hormigón en buen estado ($\epsilon_r = 6$). Los aceros se ubican de igual forma que en el modelo anterior.

Al igual que en el modelo 5, en el modelo 6 se definen los tres aceros del primer nivel y se resalta el contacto entre los hormigones fracturado y húmedo, producto del contraste de propiedades electromagnéticas. En la zona del hormigón húmedo, como se vio en

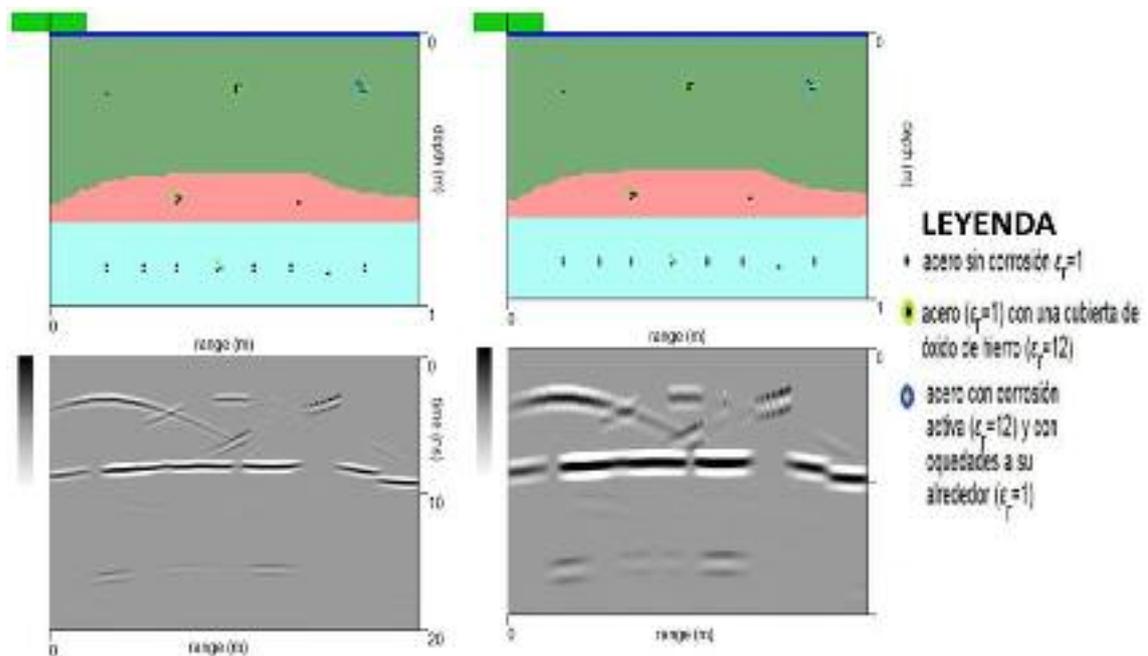


Figura 8. Modelo 6 del sector de estudio. A Realizado con una antena de 1.6 GHz, 500 scan/m y un total de 1024 muestras. B Realizado con una antena de 750 MHz 500 scan/m y 512 muestras. Ambos con ganancia 10. Zona verde ($\epsilon_r = 5$), zona rosa ($\epsilon_r = 15$) y zona azul ($\epsilon_r = 6$). Tomada de GPR-SIM (2020)

el modelo 5 (Figura 7), se dificulta la interpretación de las hipérbolas de reflexión de los aceros y no se logran detectar el tercer nivel de aceros.

Luego de llevarse a cabo la modelación de diferentes escenarios en el sector de estudio, se propone seleccionar la antena de 1.6 GHz para realizar la adquisición de datos. Esta decisión se basa en la necesidad de realizar un trabajo de detalle, algo que con la antena de 750 MHz no se logra. Según los resultados de las modelaciones, con 20 ns como ventana de tiempo, se logra alcanzar la profundidad deseada, mientras que con un mayor valor no cambian los resultados y se torna más engorroso. En cuanto a la cantidad de muestras por scan, los radargramas tienen mayor definición con 512 muestras. Al utilizar un menor número, los reflectores en algunas ocasiones se detectan con menor calidad. Otro parámetro a definir es la cantidad de scan por metro; en este aspecto no hubo cambios apreciables al variar los valores, entre 400 y 1000 *scan/m*, por lo que se trabajó con 500 *scan/m* porque si se aumenta mucho la cantidad se dificultan y ralentizan las mediciones. La adquisición será mediante *C-scan* para lo-

grar una mayor cobertura y poder cartografiar la corrosión de los aceros en la parte superior del muro.

La variante de adquisición a aplicar (Figura 9) incluye tres perfiles longitudinales (color rojo), uno en la cara interior del muro (lado de la acera), a 0.50 m de la acera (P1), otro encima del muro, a 0.25 m del borde interior (P2), un perfil (P3) a 0.50 m del borde exterior del muro (lado del mar) y perfil a 1.50 m desde el mismo borde exterior (P5), sobre la base del muro. Los perfiles transversales (color azul) se realizarán en la misma disposición que en la variante 1 (P4). La ventaja de esta variante es que presenta una mayor caracterización de los estribos en el lado exterior del muro y el estudio de la base del mismo, a la cual no llega la antena de 1.6 GHz desde encima del muro. Esta opción es la más completa de todas, asegura que cada estribo del primer y segundo nivel, puedan ser caracterizados por tres perfiles y un cuarto perfil caracterizaría la base del muro. Los perfiles transversales cortarían a todos los aceros longitudinales cada 40 cm, tanto los que se ubican en la cara interior y encima del muro, como en su cara exterior.



Figura 9. Variante de adquisición. Cuatro perfiles longitudinales (color rojo) y una serie de perfiles transversales (color azul). Tomada por el autor.

Tanto los perfiles longitudinales como transversales, se trazarán en zigzag, de manera que se ahorre tiempo. Para velar por la calidad de la adquisición de los datos, hay que llevar a cabo las mediciones en un período donde no hayan ocurrido fuertes mareja-

das, donde se asegura que el hormigón se encuentre lo más seco posible, para que el contenido de humedad sea menor y puedan ser identificados los aceros con distintos grados de corrosión.

CONCLUSIONES

Mediante la investigación bibliográfica se pudo caracterizar la señal electromagnética de alta frecuencia asociada a las patologías presentes en estructuras de hormigón armado afectadas por la corrosión y se determinó que los aceros embebidos en el hormigón se caracterizan por una hipérbola de alta amplitud, los aceros corroídos, en su fase inicial, por una baja amplitud y a medida que aumenta el grado de corrosión, su amplitud también aumenta, pero sin superar a los aceros sin corroer; las oquedades presentan alta amplitud en sus hipérbolas y cambios de polaridad en la onda, mientras que los valores bajos de intensidad de la señal son característicos de las zonas con humedad.

A través del GPR-SIM se realizó una simulación de la respuesta electromagnética de alta frecuencia de un sector del muro del malecón habanero comprendido entre las calles B y C, afectado por la corrosión donde se corroboró los resultados de la investigación bibliográfica preliminar y se obtuvo que los aceros que se encuentran en hormigón seco se definen con claridad y gran intensidad de reflexión, contrario a cuando están embebidos en zonas húmedas donde disminuye su amplitud y debido a la disminución de la velocidad de la onda se ubican a mayor profundidad las hipérbolas y se delimita como zona de corrosión.

Para evaluar el estado técnico del sector del muro del malecón habanero, comprendido entre las calles B y C, afectado por la corrosión, se propone una variante para la adquisición con el empleo de una antena de 1.6 GHz, ventana de tiempo de 20 ns, 500 scan/m y 512 muestras. Perfiles en la cara exterior del muro, a 0.50 m de la acera, otro encima del muro, a 0.25 m del borde interior, un tercer perfil a 1.50 m desde el mismo borde interior, sobre la base del muro y perfiles transversales espaciados a 0.4 m.

AGRADECIMIENTOS

Agradecerle a Dean Goodman, ingeniero geofísico del Geophysical Archeometry Laboratory, por brindar la licencia del software GPR-SIM, la cual fue de vital importancia para el desarrollo de este trabajo y por sus aclaraciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre A. M.; Mejía De Gutiérrez R.**, 2013, Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas: *Materiales de Construcción*, 63, 7-38.
- Alla, A.**, 2016, Análisis comparativo de normativas: ACI 318-14 y EHE-08. Departamento de la tecnología de la construcción. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Trabajo de fin de grado.
- Amran, T.S.T.; Ismail, M. P.; Ismail, M A; Amin, M S M; Ahmad, M R; Basri, N. S. M.**, 2017, GPR application on construction foundation study: IOP Publishing, 271.
- Avendaño Rodríguez, E.** «Detección, tratamiento y prevención de patologías en sistemas de concreto estructural utilizados en estructura industrial». Trabajo de grado (inédita, Facultad de ingeniería civil, Universidad de Costa Rica, 2006, 19 p.
- Barreto Paredes, E. A.; Ganzhi Fajardo, R. D.**, 2018, Evaluación de columnas de hormigón armado mediante métodos no destructivos, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Cuenca, trabajo de titulación como arquitecto.
- Beben, D.; Mordak, A.; Anigacz, W.**, 2013, Ground Penetrating Radar applications to testing of reinforced concrete beams: *Procedia Engineering*. 65, 242-247.
- Bonomo, N.; De La Vega, M.**, 2006, El método del Georradar. *Arqueogeofísica. Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado*, 73-103.
- Cassidy, N.J.; Eddies, R., Dods, S.**, 2011, Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques: *Journal of Applied Geophysics*, 74, 263-276.
- Dinh K.; Zayed, T.; Tarussov A.**, 2013, GPR image analysis for corrosion mapping in concrete slabs. En: CSCE General Conference Canada.
- Esteve Escrivá, J. C.**, 2005, Aplicación del GPR como técnica geofísica en la investigación arqueoló-

- gica en la capilla de San Francisco de Asís, Universidad de Alicante-Proyecto Habana, proyecto final de carrera.
- González Roura, N.**, 2013, Comparación de técnicas no destructivas en la inspección del hormigón armado: Georradar versus tomografía ultrasónica, Universidad politécnica de Valencia, proyecto fin de máster.
- Goodman, D.**, 1994, «Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology». *Geophysics*, 59 (2). 224-232.
- Goodman, D.** **GPR Simulation Software «GPR-SIM»**, (programa informático), versión 3.0, California, actualización: febrero 2020, revisión: agosto/2020.
- Höla, J.; Bien, J.; Sadowski, L.; Schabowicz, K.**, 2015, Non-destructive and semi-destructive diagnostic of concrete structures in assessment of their durability: Bulletin of the polish academy of sciences, 63, 87-96.
- Hong, S.; Lai, W. L.; Wilsch G.; Helmerich, Rosemarie; Helmerich, Robert. Günther, T.; Wiggenhauser, H.**, 2014, Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR: *Construction and Building Materials*, 66, 671-684.
- Howland-Albear, J.J.; Castañeda-Valdés, A.; Corvo-Pérez, F.; Martín Acosta, A. R.**, 2014, Estudio del ambiente agresivo costero de la Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado, *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 1-8.
- Hugenschmidt J.; Kalogeropoulos A.**, «The inspection of retaining walls using GPR». *Journal of Applied Geophysics*, 2009, vol. 67, p. 335-344.
- Istiaque H.; Yazdani N.**, 2014, Ground penetrating radar utilization in exploring inadequate concrete covers in a new bridge deck: *Construction Materials*, 1,104-114.
- Kabir, S.; Zaki, A.**, 2011, Detection and quantification of corrosion damage using Ground. In: *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Marrakesh, Morocco.
- Kim, W.; Ismail, A.; Anderson, N. L; Atekwana, E. A.; Buccellato**, 2003, A. Non-destructive testing (NDT) for corrosion in bridge decks using GPR. In *Proceedings of the 3rd International Conference on the Application of Geophysical Methodologies and NDT to Transportation Facilities and Infrastructure*, Geophysics.
- Krishnarajapete, Raju, R.**, 2015, Estimation of rebar corrosion in concrete using ground penetrating radar, Universidad de Texas y Arlington, Trabajo de maestría.
- Lai, W-L.; Dérobert, X.; Annan P.**, 2013, Measurement of accelerated steel corrosion in concrete using ground-penetrating radar and a modified half-cell potential method, *Journal of infrastructure systems*. ASCE.
- Lai, W-L.; Dérobert, X.; Annan P.**, 2017, A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis, *NDT&E International*.
- Lakshmi, K. A.; Rahamath, A.**, 2016, Estimation of rebar radius using Ground Penetrating Radar: *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE)*, 22(2)
- Morris, I.; Abdel-Jaber, H; Glisic, B.**, 2019, «Quantitative attribute analyses with Ground Penetrating Radar for infrastructure assessments and structural health monitoring». *Sensors*. Vol 19 (7)
- Pellicer Llopi, V.**, 2014, Ensayos no destructivos en hormigón. *Georradar y ultrasonidos*, Universidad de Valencia.
- Porto Quintián, J.**, 2005, *Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado*. Universidad da Coruña,
- Prego, F. J.; Núñez-Nieto, X.; Arias, P.**, 2016, Assessing the applicability of Ground-Penetrating Radar to quality control in tunneling construction, *ASCE*.
- Saricicek, I.; Seren, A.**, 2014, Zigina, Torul with ground penetrating radar, *IEEE Xplore*. DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970452

- Solla, M., Lagüela, S.; Fernández, N., Garrido, I.,** 2019, Assessing rebar corrosion through the combination of nondestructive GPR and IRT methodologies. *Remote Sensing*, vol. 11,
- Sossa, V.; Pérez-Gracia, V.; González-Drigo, R.; Rasol, M.,** 2019, Lab Non Destructive Test to Analyze the Effect of Corrosion on Ground Penetrating Radar Scans: *Remote Sensing*, 11(23), 2814.
- Tosti, F., Ferrante, C.,** 2019, Using ground penetrating radar methods to investigate reinforced concrete structures: *Surveys in Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09565-5>. Springer.
- Wong, T. W.; Lai, W. W.; Sham, J. F.; Poon, C.,** 2019, Hybrid non-destructive evaluation methods for characterizing chlorideinduced corrosion in concrete: *NDT and E International*, 07 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.05.008>
- Xiang, L.; Zhou, H.; Shu, Z.; Tan, S.; Lian, G.; Zhu, J.,** 2013, GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study: *NDT&E International*, 59, 68-76.
- Zaki, A.; Megat Johari, M. A.; Wan Hussin, W. M. A.; Jusman, Y.,** 2018, Experimental assessment of rebar corrosion in concrete slab using Ground Penetrating Radar (GPR: *International Journal of Corrosion*.
- Fecha de recepción: 22 de septiembre de 2020
Fecha de arbitraje: 17 de diciembre de 2020
Fecha de aprobación: 11 de marzo de 2021



Ubicación de elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental bajo las rocas del Arco Volcánico Cretácico y las ofiolitas para la exploración petrolera en Cuba

Aliss María Bejerano Kindelan¹, José Luis Gemen Prol Betancourt², Guillermo Miró Pagés³ y María Caridad Rifá Hernández⁴

- ¹ *Ingeniera Geofísica. Especialista III en investigación. Innovación y desarrollo. Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba. Correo electrónico: aliss@digicupet.cu.*
- ² *Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar del Centro Politécnico del Petróleo (CPP) y de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» (CUJAE). Investigador Auxiliar del Centro de Investigaciones del Petróleo (Ceinpet), La Habana, Cuba. Correo electrónico: prol@digicupet.cu.*
- ³ *Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» (CUJAE), La Habana, Cuba. Correo electrónico: gmiró@civilmail.cujae.edu.cu.*
- ⁴ *Ingeniera Geofísica. Máster en Geofísica aplicada a la exploración de petróleo y gas. Profesora entrenadora del Centro Politécnico del Petróleo. Instructora de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría» (CUJAE), La Habana, Cuba. Investigador Auxiliar del Centro de Investigaciones del Petróleo. Correo electrónico: rifa@digicupet.cu.*

RESUMEN

La modelación de las anomalías gravitacionales y magnéticas favorece la comprensión de la configuración y forma de yacencia de los cuerpos rocosos del subsuelo. Cada cuerpo rocoso da origen a diferentes anomalías de campos potenciales, en dependencia de la geometría de los mismos (profundidad, tamaño y extensión). Sin embargo, en condiciones geológicas complejas como son los cinturones de cabalgamiento, las rocas se encuentran imbricadas y una anomalía puede ser descrita como la suma de contribuciones de diferentes fuentes. Hallar un modelo adecuado para la ubicación elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental bajo las rocas del Arco Volcánico Cretácico y las ofiolitas conduce a la integración de información sísmica, datos geológicos superficiales y de pozos, y como metodología fundamental es impres-

cindible la analogía con las anomalías donde se ha encontrado este tipo de estructuras. De esta manera, se reduce así el grado de incertidumbre del modelo. El estudio del campo gravitacional en diferentes bandas del espectro de frecuencia y la modelación permitieron ubicar aquellos sectores donde con mayor probabilidad se elevarán las secuencias del paleomargen continental. De esta manera, como resultado se presenta un mapa de regionalización geológica de las anomalías gravitacionales y modelos geólogo-geofísicos a lo largo de perfiles representativos.

Palabras claves: paleomargen continental, arco volcánico cretácico, espectro de frecuencia, campo gravitatorio, campo magnético, modelación compleja.

ABSTRACT

The modeling of gravitational and magnetic anomalies

favors the understanding of the configuration and form of bedrock of the rocky bodies of the subsoil. Each rock body gives rise to different potential field anomalies, depending on their geometry (depth, size and extension). However, in complex geological conditions such as thrust belts, rocks are imbricated and an anomaly can be described as the sum of contributions from different sources. Finding a suitable model for the location of the folded sediment elevations of the continental paleomargin under the rocks of the Cretaceous Volcanic Arc and ophiolites leads to the integration of seismic information, surface geological data and wells, and as a fundamental methodology the analogy with the anomalies where this type of structure has been found. In this way, the degree of uncertainty of the model is reduced. The study of the gravitational field in different bands of the frequency spectrum and the modeling made it possible to locate those sectors where the sequences of the continental paleomargin were most likely to rise. In this way, as a result, a geological regionalization map of gravitational anomalies and geological-geophysical models are presented along representative profiles.

Keywords: continental paleomargin, Cretaceous volcanic arc, frequency spectrum, gravitational field, magnetic field, complex modeling.

RESUMO

A modelagem de anomalias gravitacionais e magnéticas favorece o entendimento da configuração e forma do alicerce dos corpos rochosos do subsolo. Cada corpo de rocha dá origem a diferentes anomalias de campo potenciais, dependendo de sua geometria (profundidade, tamanho e extensão). No entanto, em condições geológicas complexas, como cinturões de empuxo, as rochas estão imbricadas e uma anomalia pode ser descrita como a soma de contribuições de diferentes fontes. Encontrar um modelo adequado para a localização das elevações de sedimentos dobrados da paleomargem continental sob as rochas do Arco Vulcânico Cretáceo e ofiolitos leva à integração de informações sísmicas, dados geológicos de superfície e

poços, e como metodologia fundamental a analogia com as anomalias onde este tipo de estrutura foi encontrado. Desta forma, o grau de incerteza do modelo é reduzido. O estudo do campo gravitacional em diferentes bandas do espectro de frequências e a modelagem permitiram localizar os setores onde as sequências da paleomargem continental tinham maior probabilidade de subir. Desta forma, como resultado, um mapa de regionalização geológica de anomalias gravitacionais e modelos geológico-geofísicos são apresentados ao longo de perfis representativos.

Palavras-chave: paleomargem continental, arco vulcânico cretáceo, espectro de frequência, campo gravitacional, campo magnético, modelagem complexa.

INTRODUCCIÓN

En la interpretación de anomalías magnéticas y gravitacionales, ya sea la anomalía de campo total y anomalía de *Bouguer* completa respectivamente, uno de los métodos más usados es la modelación directa de estas anomalías (datos), mediante un proceso interactivo de prueba y error. La señal gravitacional/magnética producida por cuerpos de ciertas formas y contraste de densidades/magnetizaciones es directamente comparada con los datos. Si el ajuste a los datos se considera que es inadecuado, se varían las formas y densidades/magnetizaciones de estos cuerpos de modo iterativo, hasta conseguir el ajuste deseado. En este modelamiento, las estructuras a estudiar varían principalmente en 2 dimensiones (x, z) y en el sentido perpendicular (y) se extienden de manera indefinida. Aunque en la realidad este no sea el caso, el carácter bidimensional de las estructuras es, sin embargo, una buena y útil primera aproximación a la realidad.

Bejerano-Kindelan *et al.*, (2020) consideran que en el área de trabajo los cuerpos buzan en dirección sureste-noreste con aproximadamente 70 grados lo cual es apreciable con la información de los pozos perforados y por los modelos sismo-geológicos previamente concebidos.

Investigaciones anteriores han señalado el Mínimo Norte Cubano (MNC) como un rasgo primario en el

panorama regional del campo gravitatorio (Valencio *et al.*, 1960). A pesar de existir diversas opiniones sobre las fuentes geológicas que generan esta anomalía, se puede afirmar que la inmensa mayoría de los yacimientos descubiertos en el país hasta la actualidad, están localizados dentro de ese mínimo. La mencionada anomalía negativa responde a la existencia de grandes espesores de sedimentos plegados de las Unidades Tectono Estratigráficas (UTES) Placetas y Camajuaní, y es el único argumento geofísico de carácter regional identificado hasta el presente, que presupone la posibilidad de encontrar a estas UTES en profundidad, ya sea recubiertas tectónicamente por las rocas del arco volcánico cretácico (AVC), las ofiolitas o sedimentos postorogénicos (Rifá-Hernández, 2012; Rifá-Hernández *et al.*, 2012; Prol-Betancourt *et al.*, 2016). Las variedades efusivas y efusivos-sedimentarias del AVC y las ofiolitas se agrupan en el denominado Terreno Zaza (Hatten *et al.*, 1958).

La extensión del MNC hacia el este expresa la posible existencia de sedimentos del paleomargen continental bajo el Terreno Zaza en esa dirección. Existen evidencias geológicas que hacen suponer la presencia

de estas rocas bajo las ultrabasitas, como son los afloramientos de la Sierra de Camaján, en la provincia Camagüey, considerados como un relictos de la UTE Placetas (Iturralde y Roque, 1982). En ese sentido el área de investigación, donde se han realizado algunos levantamientos sísmicos, incluye una parte del MNC.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El área de trabajo Vertientes-La Gloria (**Figura 1**), cubre parte de las provincias Ciego de Ávila y Camagüey, al colindar al norte con la bahía de Jigüey y bahía La Gloria, al sur con la localidad de Vertientes, al este con el Neoplano Florida-Camagüey-Las Tunas y al oeste con el poblado Violeta en la provincia Ciego de Ávila. Toma parte de la llanura calcárea septentrional de Camagüey y ocupa un área de 7 900 m² (Matos-Jardines, Cuba. Político-Administrativo, 2014). En general, en el sector que ocupa la provincia camagüeyana, existen escasos grupos montañosos, entre los cuales se destacan: Sierra de Cubitas al este y Sierra de Najasa al sur. La principal elevación es el Cerro Tuabaquey con 335 m de altura (Matos-Jardines, Cuba. Físico, 2014).

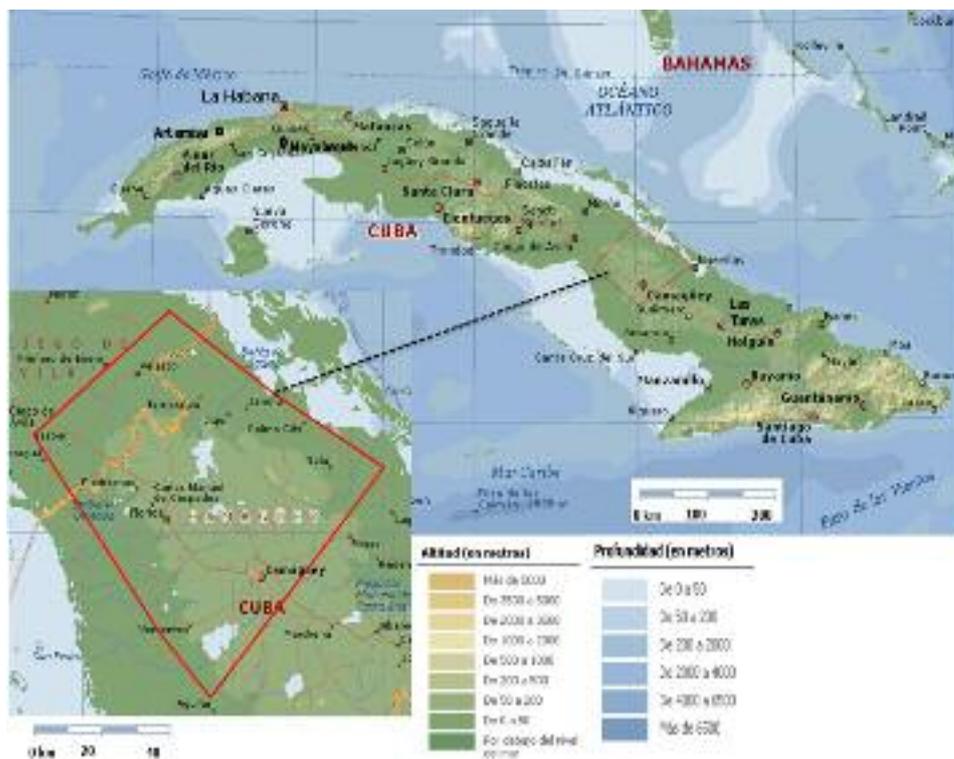


Figura 1. Área de investigación Vertientes-La Gloria (Tomado de Bejerano-Kindelan *et al.*, 2020)

MARCO GEOLÓGICO

La constitución geológica del área de estudio es muy compleja. La colisión entre la placa Norteamericana y la placa Caribe hizo posible que, en la actualidad, existan rocas de diferente naturaleza en contacto tectónico. Como resultado de ese movimiento, rocas efusivas y efusivo-sedimentarias y variedades ígneas de la corteza oceánica del Protocaribe, se desplazaron sobre sedimentos de un talud continental, y fueron formados complicados plegamientos en la forma de escamas tectónicas. Todo este complejo de rocas se comprimió

contra la Plataforma de Bahamas-Florida (UTE Remedios) durante el Eoceno Medio. En este proceso, que comenzó en el Cretácico Superior Maestrichtiano, se formaron cuencas donde se depositaban sedimentos con clastos del AVC, tales como los que caracterizan a la Formación Vía Blanca. Otros sedimentos sinorogénicos se formaron sobre el talud continental al cubrir a las Unidades Tectónicas y Estratigráficas (UTE), Placetas y Camajuaní, conocidas como las Formaciones Vega Alta y Vega respectivamente (Valladares-Amaro *et al.*, 2011) (**Figura 2**).

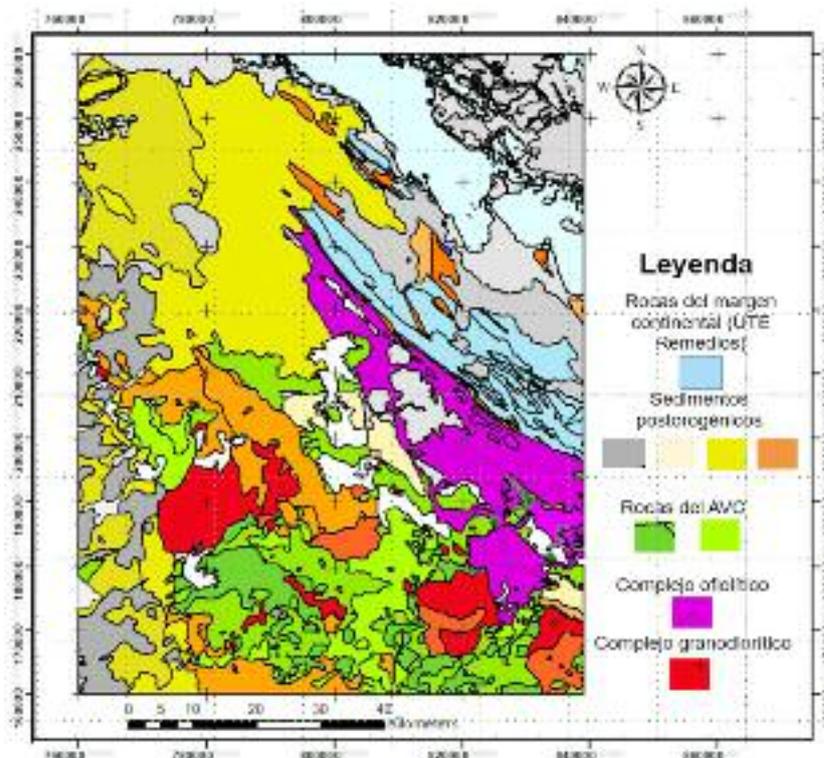


Figura 2. Mapa geológico del área de investigación (Tomado de Bejerano-Kindelan *et al.*, 2020)

MATERIALES Y MÉTODOS

Sobre la base a la concepción del análisis integrado de un conjunto de datos, a fin de disminuir en la medida posible el grado de ambigüedad en la solución de la tarea inversa, de forma inicial se concibió un procedimiento de trabajo expresado en un diagrama de bloques (**Figura 3**).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para llevar a cabo la investigación se consideró la in-

formación geológica de superficie y de pozo, el comportamiento del cuadro ondulatorio con sus posibles analogías en zonas de igual condición geológica, y la interpretación de las anomalías gravitacionales y magnéticas, enfocadas estas últimas en la modelación.

Comportamiento del cuadro ondulatorio

El cuadro ondulatorio por su complejidad es muy difícil de interpretar si no se cuenta con una concepción coherente del modelo geológico de estas regiones de



Figura 3. Diagrama indicador del flujo de trabajo

cinturones plegados. No existe experiencia previa que haya sido exitosa en la exploración de objetivos geológicos como los que se pretende localizar en el área Vertientes-La Gloria. Por eso, se hace necesario asumir con anterioridad el tipo de respuesta sísmica esperada, a partir de la extrapolación de patrones de sectores similares para identificar en los cortes sísmicos cada uno de los complejos geológicos, que por diferentes datos se conocen en estas regiones. Se debe tener en cuenta, además, las características de yacencia de los mismos, las cuales corresponden a los más fuertes eventos compresivos que puedan reportarse en la costa norte de la isla de Cuba, y es por ello que se considera sumamente complicado el corte geológico en estas regiones (Miró-Pagés, 2001; Miró-Pagés *et al.*, 2013; Miró-Pagés *et al.*, 2017). Teniendo en cuenta los yacimientos probados de la Franja Petrolera Norte Cubana (FPNC), se identifican varios paquetes sísmicos que se diferencian por su expresión cinemática y dinámica, aunque carecen de correlación con sus respectivos paquetes sedimentarios, excepto lo que se refiere a la frontera convencionalmente asociada a la llamada envolvente próxima al tope de los reservorios (Miró-Pagés, 2019). De superficie a profundidad se identifican los siguientes paquetes:

- **Postorogénicos:** corresponden en edades a rocas predominantemente del Neógeno;

presenta reflectores alargados, coherentes, con frecuencias entre 25-35 Hz, de altas a medias amplitudes, entre los cuales se distinguen regiones opacas. Dentro de ella se observan estructuras con terminaciones en *onlap*, *toplap* y *downlap* (Domínguez-Gómez, 2008; Rifá-Hernández, 2012).

- En la parte inferior, por debajo de la discordancia del Eoceno Medio, donde aparecen franjas de reflectores que se clasifican como:
- **Cuadro de ondas variado (Formación Vía Blanca):** presenta reflectores cortos dispuestos de forma caótica, de baja a media energía, en el intervalo de los conglomerados serpentiniticos; pero cuando corresponde a sedimentos terrígenos, los reflectores sísmicos son de alta amplitud, baja frecuencia y alargados.
- **Cuadro de onda asociado al sello (Formación Vega Alta):** se observan reflectores de altas amplitudes, baja frecuencia, con buena coherencia, ordenadamente dispuestos como si expresaran el buzamiento de las rocas formando estructuras envolventes, que corresponde con sedimentos terrígenos. Esta opinión quedó afirmada según datos de pozo.
- **Cuadro de onda asociado al tope del reservorio:** los sedimentos constituyentes del reservorio se presentan en la sección sísmica, inmediatamente debajo del cuadro correspondiente a la Formación Vega Alta. Son reflectores con distribución predominantemente caótica, que se agrupan en la forma de «parches», con alguna disposición ordenada solo cuando se pueden asociar a la parte más alta de la bóveda de los pliegues.

En la línea H2000 que coincide exactamente en su extremo sur con el pozo H100, se identifican las ofiolitas, la Formación Vega Alta y el reservorio. Como se puede observar, las ofiolitas conforman un manto de gran buzamiento, que comprime a la secuencia sedimentaria

ubicada más al norte; de tal manera que la UTE Placetas conforma un sistema de escamas cuya frontera sur es atravesada por el pozo H100 (Figura 4).

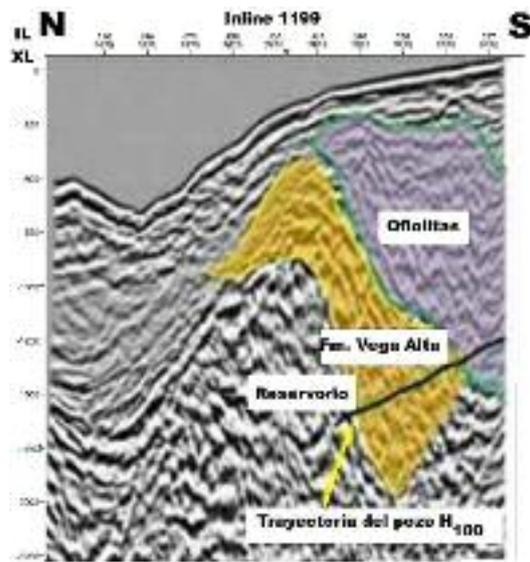


Figura 4. Línea sísmica H2000 coincidente con el pozo H100 (Rifá-Hernández, 2012).

Modelación de las anomalías magnéticas y gravitacionales

Para la modelación de las anomalías magnéticas y

gravitacionales se realizó la interpretación cualitativa de los mapas de campos potenciales, analizando las anomalías en sus respectivos entornos regionales, geofísicos y geológicos. Según lo expresado anteriormente, se puede afirmar que, en el entorno regional, el Mínimo Norte Cubano (MNC) es el ambiente geofísico adecuado para encontrar elevaciones locales de los sedimentos plegados del paleomargen continental. Con el registro de pozos de densidad se ha determinado que la UTE Placetas, perteneciente a los sedimentos plegados del paleomargen continental, no supera las 2.55 t/m³ de densidad media, probado mediante pozos. Por lo general, las serpentinitas, o los sedimentos depositados durante la orogenia cubana, que en ocasiones cubren estas estructuras, presentan densidades medias de 2.45 t/m³ (Shaposhnikova, 1969). Como se distingue en la diferencia de ambas densidades, se trata de un contraste de apenas 0.1 t/m³, capaz de generar anomalías débiles en la superficie de las mediciones. Ciertamente sobre el yacimiento Hebert, donde la perforación reporta un elevado de las calizas de la UTE Placetas bajo sedimentos del Cretácico Superior y de las serpentinas, existe un máximo local débil de 2.5 miliGales (MGAL) (Figura 5).

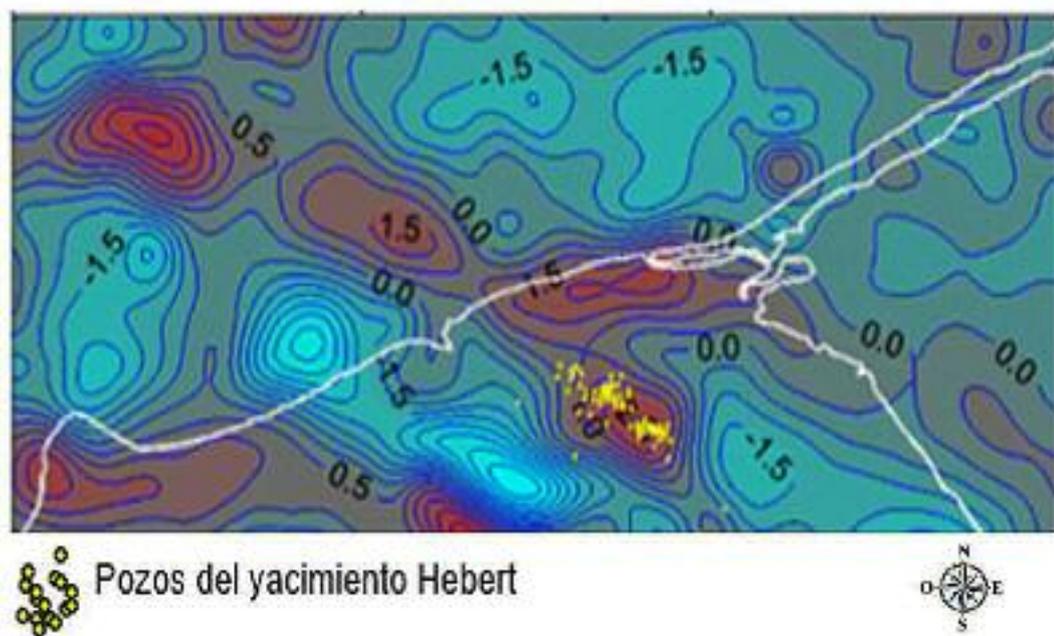


Figura 5. Mapa de anomalías locales del campo gravitatorio en el sector Maya-Varadero con resta de filtros gaussianos k4 y k 16. (Rifá-Hernández, 2012)

La regionalización geológica de las anomalías magnéticas y gravitacionales del área de investigación, permitió la ubicación de sectores favorables para la elevación de sedimentos del paleomargen continental y de esta forma, la selección de perfiles para la posterior ejecución de modelos gravimétricos y magneto-métricos complejos como parte de la interpretación cuantitativa.

Se añadirá, que los máximos magnéticos están ligeramente desplazados hacia el sur en relación con sus homólogos del campo gravitatorio. Esto se debe a la inclinación del campo inductor que en Cuba es aproximadamente igual a 54° . Investigaciones realizadas para la zona Cárdenas-Corralillo, demuestran que los máximos gravitacionales y magnéticos coinciden después de aplicar la reducción al polo (Prol-Betancourt y Rifá-Hernández, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta investigación para la selección de las anomalías locales de interés se parte de los siguientes criterios:

1. Similitud con las anomalías existentes sobre los yacimientos conocidos en otras zonas, similares al yacimiento Hebert, los máximos locales no deben exceder la intensidad de 3 mGal.
2. Los máximos locales deben encontrarse dentro del gran MNC.
3. Deben aflorar en las zonas, las rocas del Terreno Zaza, o sedimentos del Terciario o del Cretácico Superior.
4. Los máximos locales mayores de 3 mGal, aunque se encuentren dentro del MNC, deben excluirse, debido a que tienen posibilidades de estar generados por cuerpos potentes del Terreno Zaza.
5. Las anomalías en el campo magnético se deben ubicar considerando el comportamiento bipolar del campo que generan los cuerpos geológicos bajo el campo inductor en Cuba. Como es conocido, el campo normal en la latitud de Cuba presenta una

inclinación de 54° . En ocasiones, los cuerpos magnéticos generan un máximo que se ubica inmediatamente al sur de un mínimo; de tal manera que la proyección del cuerpo magnético en la superficie puede encontrarse en algún lugar de gradiente entre ambas anomalías.

En la modelación fue necesario definir la base del Terreno Zaza mediante una ley de velocidad en el corte. Para la construcción de la ley de velocidad se interpretaron secciones sísmicas migradas en tiempo antes de la suma, correlacionadas con un Perfilaje Sísmico Vertical (VSP por sus siglas en inglés Vertical Seismic Profile). Además, la interpretación cuantitativa se ejecutó sobre la base de la confección de modelos del campo magnético y gravitacional con el fin ulterior de elaborar modelos geólogo-geofísico a lo largo de los perfiles. Para ello era necesario conocer la densidad y susceptibilidad magnética del medio geológico y la base de los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas.

Para la confección y ajuste de los modelos geólogo-geofísicos se definieron sobre cada perfil un modelo de propiedades físicas, un modelo geológico y un modelo de campos físicos. Las propiedades físicas fueron estimadas según un análisis de muestras realizado en la provincia Camagüey y Las Tunas teniendo en cuenta las litologías y las edades de formación del complejo rocoso. El modelo geológico tomado como modelo de partida fue el elaborado por especialistas del Centro de Investigaciones del Petróleo; y los modelos de los campos físicos fueron elaborados mediante la interpretación cuantitativa de los campos potenciales, en aras de ajustar el campo calculado al observado.

RESULTADOS

A partir de los resultados de Bejerano-Kindelan *et al.* (2020), se focalizó el procesamiento hacia las bandas de frecuencias entre 0.08 y 0.18 Hz, para obtener mapas de anomalías locales mediante la convolución de filtros pasa banda con longitudes de onda entre 4760 y 7690 m, sobre la matriz del campo gravitatorio (**Figura 6 (3)**).

Bejerano-Kindelan *et al.* (2020), analizaron el

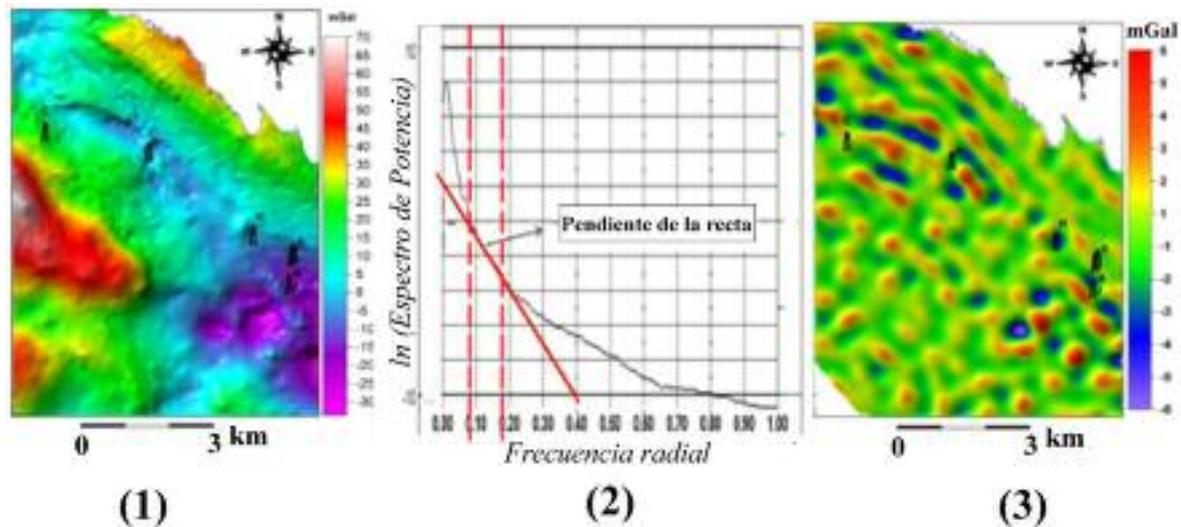


Figura 6. Mapa de anomalías de Bouguer (1). Espectro de Potencia Radial Promedio del campo gravitacional (2) (Tomado de Bejerano-Kindelan *et al.*, 2020). Mapa de anomalías locales del campo gravitatorio en la banda $\lambda = 4760$ m y $\lambda = 7690$ m (3).

comportamiento de las anomalías de campos potenciales se pueden identificar los sectores correspondientes a grandes cuerpos del AVC, las ofiolitas y los sedimentos plegados del paleomargen continental.

Los grandes cuerpos del AVC o de las rocas de corteza oceánica, cuyas bases yacen probablemente a profundidades mayores de 5 000 m, se manifiestan en el campo gravitacional como máximos intensos de carácter regional. Perforaciones ubicadas en estos máximos de gran intensidad, tales como Cabaiguán, Jobabo, Guanabacoa, entre otros, confirman lo expuesto con anterioridad. Por consiguiente, en el mapa de anomalías de Bouguer se separará una gran región en la mitad suroeste, donde predominan grandes espesores de rocas efusivas, efusivo-sedimentarias y serpentinitas pertenecientes al Terreno Zaza (**Figura 7a** elipse A).

Hacia el norte también existe una región de máximos, pero estos son ocasionados por potentes espesores de rocas muy densas de la paleoplataforma Bahamas-Florida, en la cual existen carbonatos de banco, calizas dolomitizadas, anhidritas y dolomitas, cuyas densidades medias superan los 2.70 g/cm^3 (**Figura 7a** elipse B). Entre las dos zonas señaladas se encuentra el MNC producido posiblemente por apilamientos de pliegues sedimentarios correspondientes a las UTE Placetas y Camajuaní que yacerían en profundidad (**Fi-**

gura 7a elipse D). Se presupone que el mínimo que se identifica hacia la región sureste del mapa pudiera responder a rocas ígneas de composición media a ácidas de menor densidad (**Figura 7a** elipse C).

Para precisar los límites de las zonas, se confeccionó el mapa de gradiente horizontal del campo gravitacional. Los ejes de los máximos gradientes en este mapa delimitan de forma aproximada la posición de las fallas que dividen a la región en grandes bloques tectónicos. Asimismo, el mapa de gradiente horizontal manifiesta de sureste a noroeste una cadena de máximos, generado por el contraste de densidad entre los sedimentos densos de la UTE Remedios y las rocas del Terreno Zaza (**Figura 7b** línea negra).

El contacto tectónico señalado se conoce como falla Las Villas o falla Cubitas y constituye el límite sur de la UTE Remedios. Hacia el sur del área enmarcada, por el eje del máximo gradiente, se delimita la frontera norte de los grandes cuerpos del AVC (tobas, tufitas, basaltos) (**Figura 7b**, línea azul).

Al superponer el mapa geológico, a escala 1:100 000, se distingue la falla Las Villas en la región sureste del área. Es de gran interés señalar que el hecho de coincidir el eje de máximo gradiente horizontal del campo gravitacional, con la denominada falla Cubitas, entre las calizas de agua somera y las serpentinitas, ex-

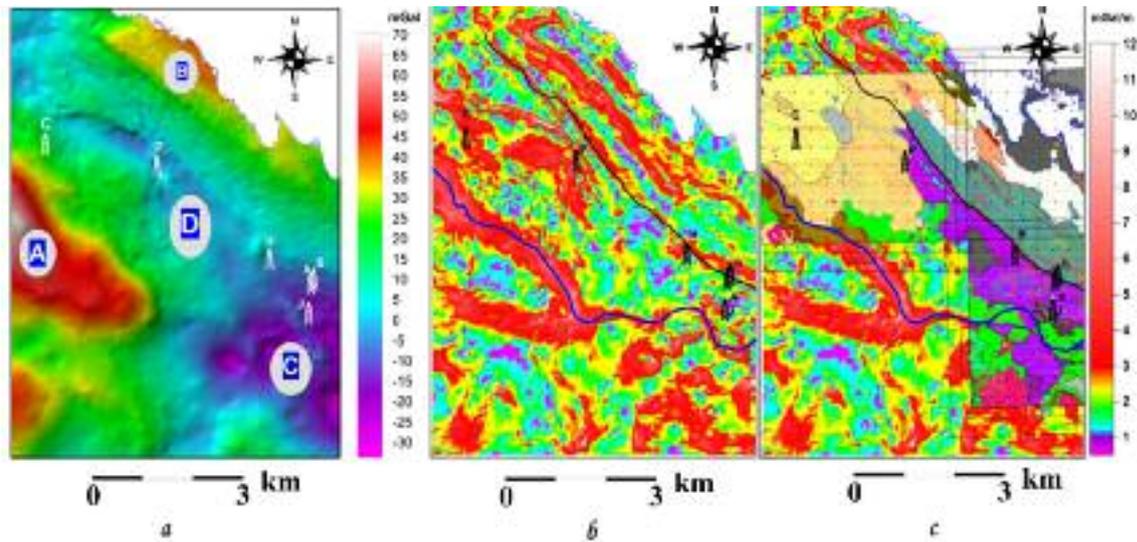


Figura 7. (a) Mapa de anomalías de Bouguer, (b) mapa de gradiente horizontal del campo gravitatorio, (c) mapa gradiente horizontal del campo gravitatorio combinado con el mapa geológico.

presa la presencia de un contacto muy abrupto de forma extrema en ese lugar. Además, la cadena de máximos que se extiende hacia el noroeste, comprueba que la falla se hunde bajo sedimentos jóvenes en esa dirección (**Figura 7c**).

Con ayuda del mapa de anomalías magnéticas

de ΔT se identifica al noroeste la cuña del Terreno Zaza que yace sobre las rocas densas de la UTE Remedios, la cual continúa hacia el sureste coincidente con la falla Las Villas. Nótese que el borde frontal de la cuña del Terreno Zaza coincide con un mínimo local del campo magnético (**Figuras 8**).

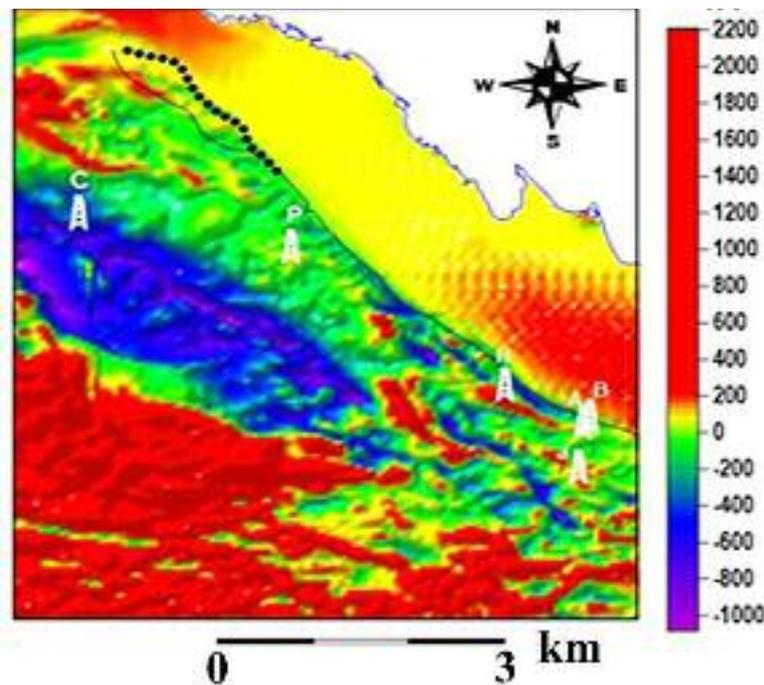


Figura 8. Mapa de anomalías magnéticas de ΔT . Línea negra discontinua límite norte de la cuya del Terreno Zaza y línea negra continua falla Las Villas

Entre el límite norte de los grandes cuerpos del AVC y la falla Las Villas se encuentra el MNC y es dentro de esta anomalía regional donde se identificarán máximos locales débiles de interés exploratorios; los cuales pudieran estar asociados a sectores elevados de las UTE Placetas y Camajuaní bajo las rocas del AVC y las ofiolitas. De esta manera, queda bien definido que hacia el norte de la falla Las Villas estarían las rocas densas de la UTE Remedios y hacia el sur los grandes cuerpos del AVC.

En el mapa residual del campo gravitatorio entre las bandas 7 690 y 4 760 m, se evidencian cinco máximos locales débiles, que no superan los 2 mGal. Las cinco anomalías locales (a, b, c, d, e), de gran interés se encuentran dentro del MNC. Las anomalías a, b, c parecen tener cierto alineamiento en rumbo noroeste-sureste (**Figura 9a**).

Para discriminar si el origen de estos máximos locales débiles es provocado por elevaciones de rocas del paleomargen continental o por cuerpos ígneos densos, se ubican en el mapa de anomalías magnéticas de ΔT . Debido a las analogías existentes con el yaci-

miento Hebert, se tiene en cuenta que los máximos locales débiles se encontrarán dentro del MNC y ser menores de 3 mGal y además ubicarse dentro de un mínimo magnético. Así, si superan los 3 mGal pudieran estar generados por potentes cuerpos densos dentro del Terreno Zaza, tal como ocurre en el pozo Jazmines 78, Cuenca Central, donde se cortaron hasta 5 000 m aproximadamente de rocas del AVC sin salir de estas. Por lo tanto, se seleccionaron dos anomalías locales que responden a posibles elevaciones de las rocas de paleotalud continental, puesto que se cumple la combinación: máximo gravitacional local débil, mínimo magnético. Las anomalías b y c son las únicas que cumplen con estas características. En cambio, la anomalía c tuvo que ser redefinida porque parte de ella no se encontraba dentro del mínimo magnético (**Figura 9b** elipse roja). Las anomalías locales a, d y e representarían solo las elevaciones del basamento, si las anomalías magnéticas con las que coinciden estuvieran asociadas a un gran aumento de la susceptibilidad magnética en el Terreno Zaza. De cualquier manera, su prioridad disminuye considerablemente.

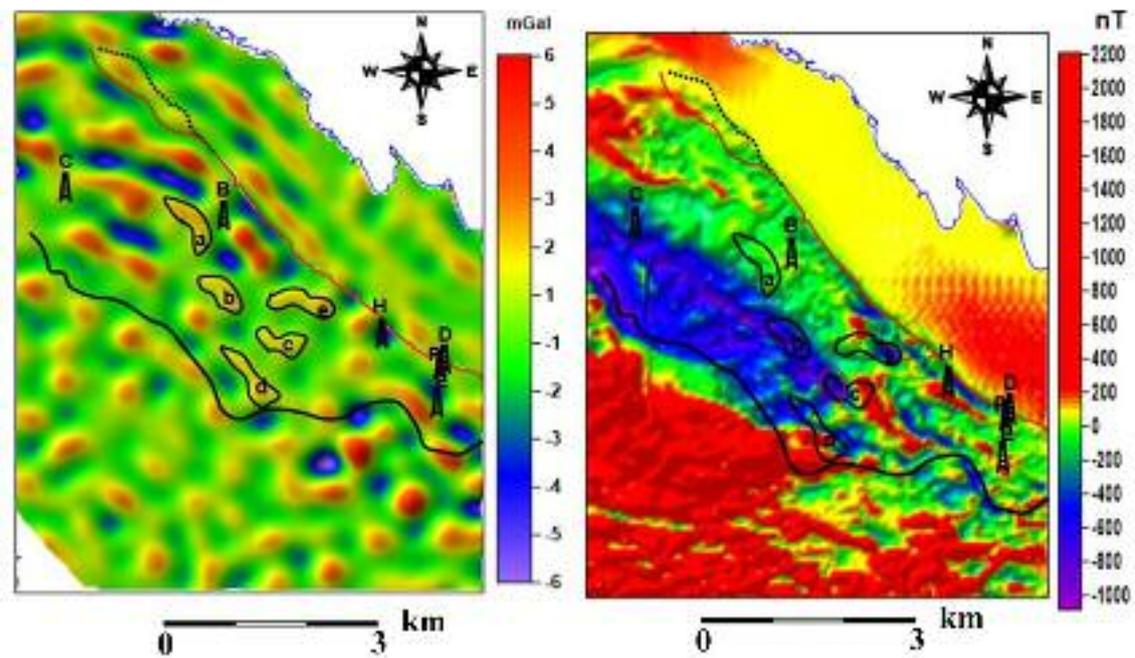


Figura 9. Mapa de anomalías locales del campo gravitatorio entre la banda $\lambda = 4\ 760$ m y $\lambda = 7\ 690$ m. (a). Mapa de anomalías magnéticas de ΔT (b).

Definidas las anomalías de interés para la exploración se trazaron tres perfiles (I, II, III), en direcciones noreste suroeste y perpendiculares a las posibles estructuras. Uno de los perfiles se trazó sobre la línea sísmica F2003 por su cercanía al sector de interés y al servir como patrón de interpretación para los otros perfiles (**Figura 10**), sobre estos últimos no existe otra información que no sea la de campos potenciales. Como los levantamientos sísmicos realizados en el área no cubren la zona de los máximos gravitacionales locales débiles b y c, no se corroborará algún alto estructural en correspondencia con estos máximos; solo cubren las anomalías a y e, las cuales tienen menor grado de interés debido a que se encuentran en un campo magnético ruidoso.

Para estimar la base de los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas se estudiaron las velocidades sísmicas de adquisiciones sísmicas anteriores y los datos de velocidades derivados del VSP. Los VSP de los pozos C, H, J y D presentan un corte de alta velocidad. El pozo H, alcanza apenas 0.66 segundos de recorrido de la onda sísmica (**Figura 11**). En un pozo «tan veloz» como este, es de esperarse que se corten sedimentos

muy densos como los de la UTE Remedios, rocas densas del AVC y las ofiolitas, tal como ocurrió en Picanes, provincia Las Tunas (Pérez-Hernández, 2016; Pérez-Hernández *et al.*, 2017). Desafortunadamente, el pozo B que es el más cercano a las líneas sísmicas, es el único pozo del sector de investigación que no posee VSP. Por lo que se procedió a encontrar dentro de los pozos una ley de velocidad con alto grado de correlación y capaz de calibrar las secciones sísmicas utilizadas. Debido a que el pozo H cumplía tales requisitos, se ajustaron los datos de velocidad de este pozo según una curva de regresión polinómica. De esta manera, la información proveniente de las secciones sísmicas solo estaría calibrada hasta el tiempo doble (*Two Wave Time TWT*) de 1.32 segundos (**Figura 11**).

El valor máximo de tiempo del pozo H fue identificado en las líneas sísmicas X2003 y F2003 y marcado con una línea negra discontinua. La frontera interpretada de color amarillo, marca un contraste entre reflectores: encima es identificable un gran paquete de reflectores mudos y caóticos y debajo reflectores cortos alineados y en dirección supuesta al ascenso de la frontera. Los autores consideran, que la

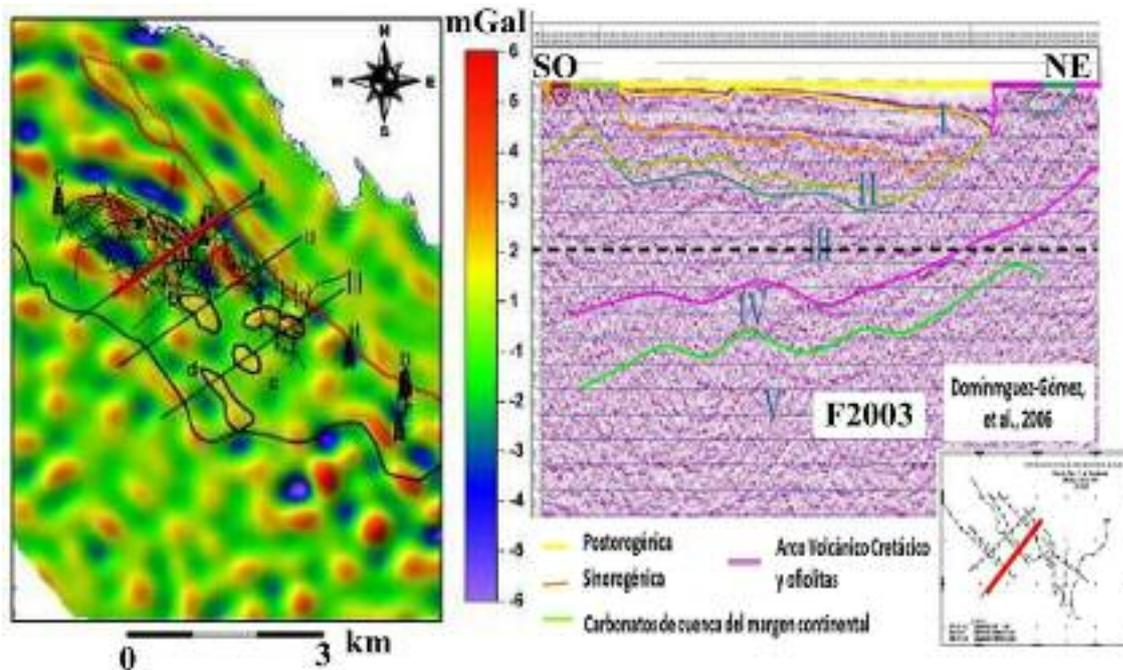


Figura 10. Ubicación de los perfiles de interpretación sobre las posibles estructuras. Sección sísmica de la línea F2003

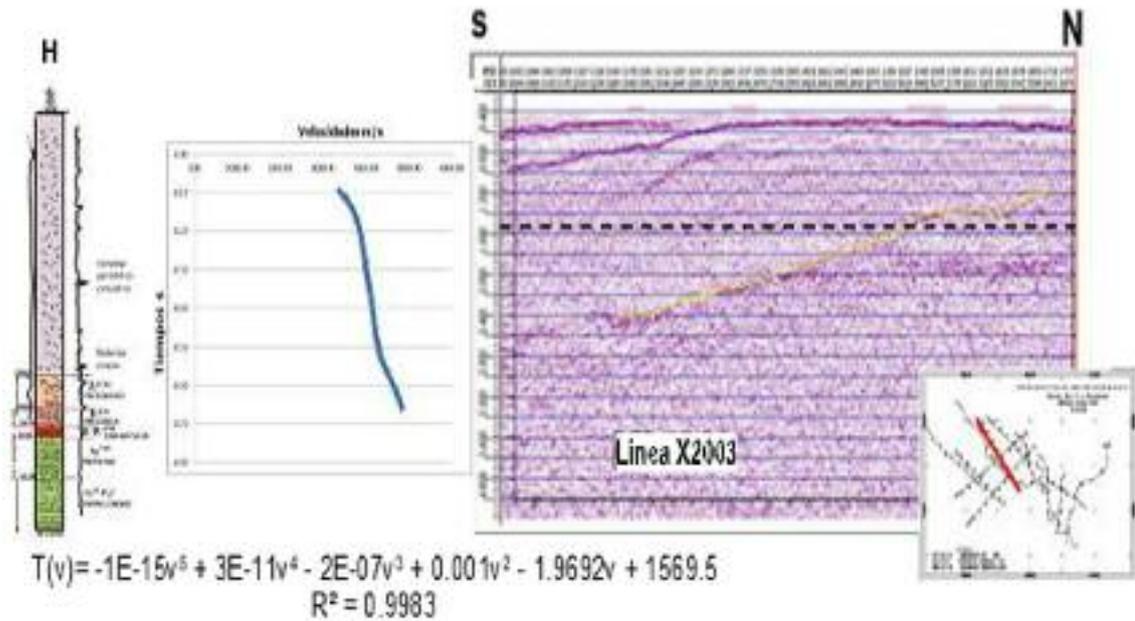


Figura 11. Ley de velocidad del pozo H e Interpretación de la base de los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas.

frontera (línea continua de color amarillo en la **Figura 11** derecha), pudiera representar la base de los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas y de forma consecuente debajo pudieran hallarse escamas tectónicas de los sedimentos plegados del paleomargen continental. Solo será calibrado el límite norte de la frontera, hacia el sur esta se encuentra a mayores tiempos y por ende a profundidades mayores

Ajuste de los modelos de campos potenciales

Para el ajuste de los modelos se tuvieron en cuenta las formaciones que cortaban los perfiles y su susceptibilidad magnética. Una simple revisión al mapa geológico de Cuba a escala 1:100 000, revela la existencia de varias rocas asociadas al AVC como por ejemplo conglomerados vulcanomícticos, tobas, tufitas y vulcanitas, al indicar que estas rocas responden a máximos en el campo magnético por su alta susceptibilidad. En esta zona el campo está muy alterado pues no solo hay fuentes someras del campo magnético que están aflorando (tope de los cuerpos magnéticos), sino que estos tienen un gran espesor. De acuerdo con las litologías que caracterizan a cada formación se le asigna una susceptibilidad inicial a cada cuerpo.

Otro elemento a tener en cuenta en el modelado es el buzamiento de los cuerpos. Un trabajo realizado por Linares (1998), al norte de Las Villas estima que la inclinación de estos cuerpos es casi vertical al alcanzar los 70 ° (Montalvo-Casanova, 2015). Se considerará que la susceptibilidad magnética será expresada en Sistema Internacional y no en el Sistema Cegesimal de Unidades Magnéticas (CSGM). Se conoce que esta propiedad es adimensional, pero si se multiplican por 4π pueden llevarse al Sistema Internacional (SI).

Los ajustes realizados al campo magnético confirman lo siguiente:

- Los grandes cuerpos magnéticos con fuerte buzamiento hacia el suroeste, llegan a alcanzar hasta $57\ 302.65 \times 10^{-6}$ SI valores de susceptibilidad magnética, localizándose sus bases entre 6 000 y 7 500m de profundidad en lo que se refiere a los grandes cuerpos del AVC (zona A en la **Figura 12**). Es razonable pensar que el intenso buzamiento en dirección norte-noreste, haya sido ocasionado por el proceso compresivo contra la plataforma Bahamas-Florida, la que constituyó una barrera natural durante

la orogenia. De esta forma, los cuerpos del AVC fueron emplazados casi verticalmente. La imbricación entre sedimentos sinorogénicos y cuerpos de ofiolitas ha sido explicada en otras investigaciones para otros sectores del territorio cubano que pueden considerarse análogos al sector investigado en esta tesis (Rifá-Hernández, 2012).

- Existe una variación entre los cuerpos que constituyen la zona B (**Figuras 12 y 13**). Cuerpos altamente magnéticos en ocasiones se alternan con cuerpos de menor susceptibilidad magnética a lo largo de los perfiles al dar como respuesta un campo altamente ruidoso. Al norte existe una zona de baja susceptibilidad magnética que alcanzará hasta $37\ 699.11 \times 10^{-6}$ si. En esta región el espesor de las rocas del Terreno Zaza disminuye hasta los 2 000 m.
- Finalmente, la zona C representa desde el punto de vista magnetométrico un gran cuerpo cuya susceptibilidad es despreciable y que corresponde a los sedimentos de la UTE Remedios. Esta zona se caracteriza por un campo magnético tranquilo y poco perturbado que asciende suavemente hacia el norte. Dicha elevación del campo puede ser asociada a la elevación del basamento, alejada de la superficie a profundidades de 8 000m a 10 000 m (**Figuras 12 y 13**).

Para el ajuste del campo gravitacional se tomaron los modelos magnetométricos ajustados y se le agregó la curva de anomalías de reducción *Bouguer* en el software Geomodel. Al estimar una densidad promedio ponderada de 2.4 g/cm^3 , se procedió a variar los contrastes de densidad dentro de un rango permisible, de forma tal que se ajustó al campo observado el campo calculado. Este proceso solo se llevó a cabo sobre los perfiles II y III porque mostraban anomalías gravitacionales favorables a posibles sectores elevados de los sedimentos plegados del paleomargen continental. Sobre el perfil línea sísmica F2003 solo se ajustó mag-

netimetría para pronosticar la supuesta base del Terreno Zaza y guiar la modelación sobre los perfiles II y III.

Los ajustes realizados al campo gravitacional confirman lo siguiente:

- Hacia el sur el máximo gravitacional de las curvas de anomalías de Bouguer, evidencian rocas de elevada densidad al alcanzar los 2.76 g/cm^3 . Esta zona representa los grandes cuerpos del AVC conformados por gabros y gabrodioritas, en ocasiones recubiertas por rocas ácidas de la Formación Caobilla (**Figura 12 y 13**).
- Hacia el norte, como evidencia de los frentes de cabalgamiento existe un mínimo gravimétrico asociado a una cuenca sinorogénica. Con probabilidad, este mínimo también represente el choque abrupto de los grandes cuerpos del AVC que durante la orogenia cabalgaron sobre los carbonatos de cuencas del margen continental. Este contacto abrupto se ha identificado en esta investigación como el límite norte de los grandes cuerpos del AVC (**Figura 12 y 13**).
- La cuña de las rocas del Terreno Zaza, presenta una densidad variable entre los 2.42 g/cm^3 hasta 2.47 g/cm^3 , debido al mayor o menor grado de fracturación de las rocas. La zona A cuenta del esfuerzo al que estuvo sometida al ser comprimida entre los grandes cuerpos del AVC y el promontorio de Remedios. Sobre esta cuña se extiende un mínimo gravitacional regional con presencia de máximos locales aislados (**Figura 12 y 13**).
- El mínimo regional responde a los sedimentos plegados del paleomargen continental y no es más que el MNC en el sector de investigación. No siempre son coincidentes los máximos locales con elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental, en ocasiones están asociados con cuerpos ígneos super-

ficiales de mayor densidad. La densidad de estas rocas varía desde los 2.55 g/cm³ hasta los 2.68 g/cm³ y con probabilidad yacen entre los 4 000 m y 6 000 m. Sobre los sedimentos plegados del paleomargen continental se encuentran en contraste negativo, sedimentos sinorogénicos que constituyen un sello regional. Este sello alcanza una densidad de 2.35 g/cm³ (Figura 12 y 13).

- Hacia el norte, se observa un campo gravitatorio tranquilo al ascender hacia el norte. Este máximo refleja las dolomitas, anhidritas y calizas dolomitizadas de la UTE Remedios al alcanzar densidades 2.74 g/cm³ (Figura 12 y 13).
- En contacto tectónico con la cuña del Terreno Zaza y al norte de ella, aparece una cuenca comprimida contra las calizas, evaporitas y dolomitas de la UTE Remedios (Figura 12 y 13). Se caracteriza por una cadena de mínimos estrechos locales del campo gravitatorio que se ubica de forma inmediata al sur de la falla Las Villas. Se trata de un accidente geográfico que existió como cuenca de antepaís para todo el oró-

geno y contiene fragmentos de las rocas del Terreno Zaza, de modo presumible sobre sedimentos erosionados del banco carbonatado que existe al norte (Iturralde-Vinent, 2012) densidad alcanza los 2.23 g/cm³.

- En profundidad, entre los 8 000 m y 10 000 m, se encuentra el basamento con una densidad de hasta 2.83 g/cm³.
- Una particularidad favorable resultó ser el hecho que debido a que el perfil III corta también las anomalías d y e, confirmó que la anomalía d corresponde a un cuerpo denso del AVC, como había planteado la autora en la interpretación cualitativa. Sin embargo, según el modelado la anomalía responde de forma favorable a elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental (Figura 12 y 13) y coincide con un alto estructural interpretado por sísmica como estructura Los Joberos Sur 15F (Álvarez-Castro *et al.*, 2002).

DISCUSIÓN

La anomalía a se encuentra sobre sedimentos postorogénicos y en la periferia del pozo B, donde se reportan

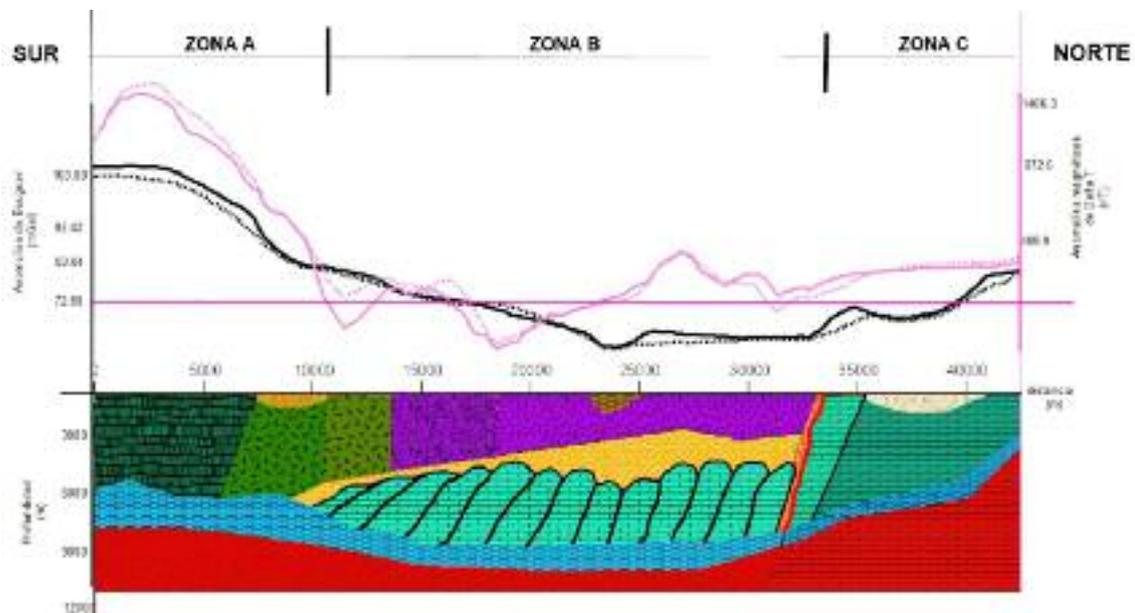


Figura 12. Modelo geológico-geofísico por el perfil II

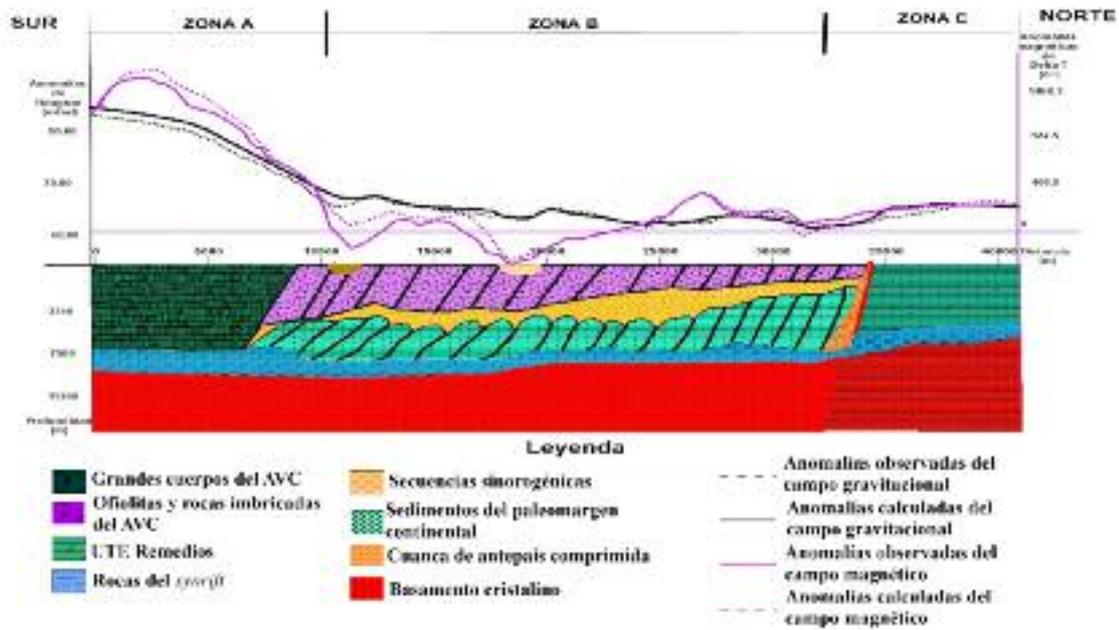


Figura 13. Modelo geólogo-geofísico por el perfil III

más de 2 000 m de rocas del complejo peridotítico acumulativo. De igual criterio, son las interpretaciones sísmicas de las líneas que recubren esta área donde los especialistas confirman que, hacia el suroeste, la base del alóctono yace más profunda. La anomalía d se encuentra en la porción sur del sector, casi en contacto con el límite norte de los grandes cuerpos del AVC por lo que, al tener en cuenta datos de pozos, aquí los espesores de rocas efusivas y efusivo-sedimentarias pueden alcanzar más de 5 000 m. En cambio, la anomalía e está sobre una cadena de máximos y mínimos propio de la parte frontal de la cuña del Terreno Zaza. Sin embargo, si se sigue en dirección noroeste la cadena de los mínimos magnéticos, estaría en correspondencia con rocas de la cuenca de antepaís que quedó comprimida contra el promontorio de la UTE Remedios durante la orogenia (Iturralde-Vinent, 2012). La anomalía b se encuentra sobre una cuenca postorogénica donde abundan sedimentos palustres y calizas, margas, calizas arcillosas, biodetríticas, biohémicas y dolomitizadas de la Formación Paso Real. La anomalía c se encuentra sobre un Complejo Plagiogranítico, depósitos eluvio-coluviales y rocas limo-calcáreas o arcillosas, margas, pseudoconglomerados, conglomerados

calcáreos y polimícticos, constituidos por serpentinitas, gabros, cuarzo, vulcanitas y granitoides de la Formación Vázquez (Colectivo-de-Autores, 2013). De esta forma, se confeccionó el mapa de regionalización geológica de las anomalías de campos (Figura 14).

CONCLUSIONES

La regionalización geológica de las anomalías de los campos potenciales, la interpretación compleja de los campos magnético y gravitatorio en diferentes bandas del espectro de este y la generación de modelos gravimétricos y magnetométricos complejos, en conjunto con los datos geológicos y sísmicos, ha permitido identificar un sector, donde el espesor del Terreno Zaza probablemente disminuye y por lo tanto, los sedimentos plegados del paleomargen continental están más próximos a la superficie aquí.

Dentro de la región más favorables se han delimitado anomalías locales gravitacionales de baja intensidad que pudieran estar asociada a elevaciones de los sedimentos plegados del paleomargen continental bajo los grandes cuerpos del AVC y las ofiolitas.

Los modelos magnéticos y gravimétricos reflejan enormes espesores de rocas del AVC y ofiolitas de

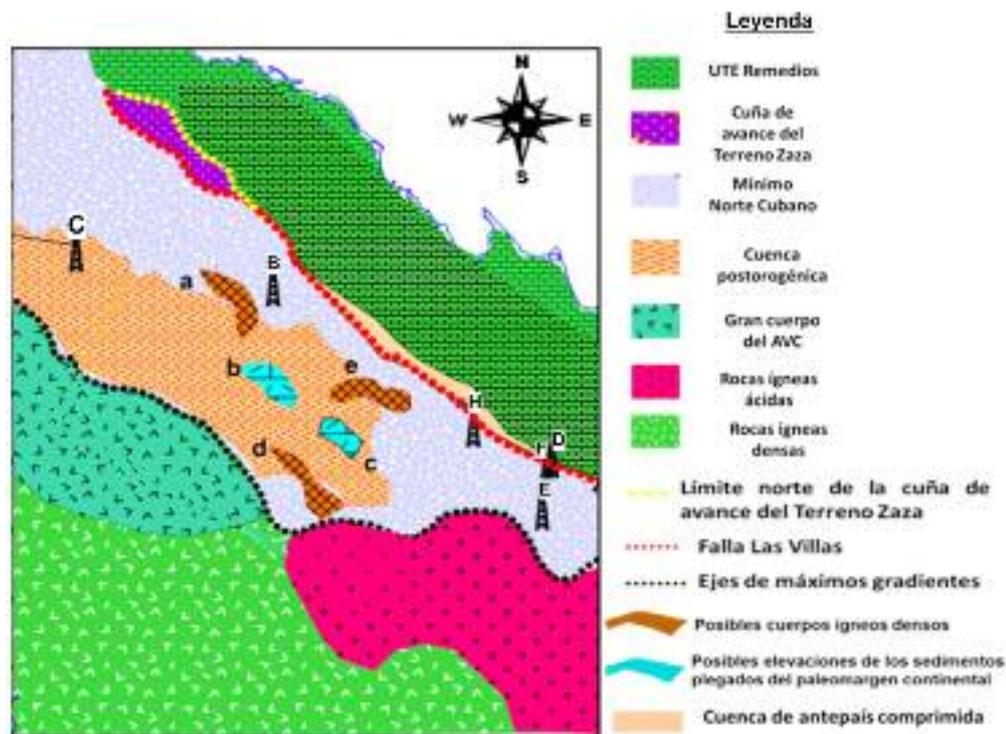


Figura 14. Mapa de zonificación geológica de campos potenciales

alta susceptibilidad magnética y alta densidad y revelan la presencia de un campo magnético ruidoso sobre la cuña del Terreno Zaza y a su vez, un mínimo gravimétrico regional correspondiente a los sedimentos plegados del paleomargen continental que yacerían en profundidad por debajo esta cuña.

La profundidad de la base de las rocas del Terreno Zaza es variable a lo largo de los perfiles, entre los 2 000 m y 3 250 m al noreste y hasta los 6 000 m y 7 500 m al suroeste.

Los modelos geólogo-geofísicos indican que, en las zonas dentro del MNC donde coinciden máximos gravimétricos locales y mínimos magnéticos, probablemente se ubican los sedimentos plegados del paleomargen continental, pronosticándose sus profundidades de yacencia entre los 4 000 m y 6 000 m en la región investigada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez-Castro, Otero-Ramírez, López-Mora, Domínguez-Garcés y Prol-Betancourt, 2002, Evaluación de objetivos y prospectos de los blo-

ques 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 21. In. Cuba: CEIPET, p.160.

Bejerano-Kindelan A.M., Prol-Betancourt J.L.G., Miró-Pagés G., Rifá-Hernández M.C., 2020, Transformaciones de campos potenciales para la separación de la contribución de distintas fuentes de anomalías en la exploración petrolera en Cuba. Caso Vertientes-La Gloria: revista Geociencias UO, v.3, núm. 2, diciembre 2020, pp 11.

Colectivo-de-Autores, 2013, Léxico Estratigráfico de Cuba. In IGP. La Habana: Servicio Geológico de Cuba, vol. 3, p. 255-257.

Domínguez-Gómez, 2008, Caracterización sísmica de los reservorios del terciario inferior en la Franja Septentrional Petrolera Cubana. In.: Universidad de Pinar del Río «Hermanos Saíz Montes de Oca», p. 103.

Hatten, C.W., Schooler, O.E., Giedt, N. Y Meyer, A.A., 1958, Geology of Cuban central, eastern Las Villas and western Camagüey provinces. In INÉDITO. La Habana: Fondo geológico del Ministerio de Industria Básica.

- Iturralde-Vinent**, 2012, Geología y Plaeogeografía. Unidades Tectono-Estratigráficas. Compendio de Geología de Cuba y del Caribe, vol. II.
- Iturralde Y. Roque**, 1982, La falla Cubitas su edad y desplazamientos. Ciencias de la Tierra y el Espacio, vol. 4.
- Matos-Jardines**, 2014, Cuba. Físico. In Arias-Ramires, Pescoso-Vives y Martínez-Núñez. Ediciones GEO. La Habana: Empresa Cartográfica y Soluciones- Geomáticas.
- Matos-Jardines. Cuba**, 2014, Político-Administrativo. In Pescoso-Vives y Martínez-Núñez. Ediciones GEO. La Habana: Empresa Cartográfica y Soluciones Geomáticas.
- Miró-Pagés**, 2001, Principales tipos de fronteras reconocidas mediante la prospección sísmica. Memorias del V Congreso de Geología y Minería.
- Miró-Pagés, Escartín-Sauleda; Amador-Longoria**, 2013, Nuevas tendencias de la exploración sísmica. Revista Cubana de Ingeniería, vol. IV, no. 2.
- Miró-Pagés, Prol-Betancourt, Rifá-Hernández y Echagarruga-Palomo**, 2017, Métodos geofísicos integrados en la exploración petrolera en los cinturones de cabalgamiento. Revista Cubana de Ingeniería, vol. 8.
- Montalvo-Casanova**, 2015, Determinación de la base de los cuerpos magnéticos del Arco Volcánico del Cretácico y las ofiolitas al norte de la provincia Camagüey-Las Tunas, Cuba. In Departamento de Geociencias. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría», CUJAE, p. 56.
- Pérez-Hernández, Y.**, 2016, Calibración Geológica de fronteras sísmicas en secciones 2D terrestre del sector Maniabón-La Farola, Las Tunas, utilizando datos geólogos-geofísicos correspondientes al pozo Picanes 1x. In Departamento de Geociencias. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría», CUJAE, p. 97.
- Pérez-Hernández, Y., Veiga-Bravo, C. Y Miró-Pagés, G.**, 2017, Calibración sísmogeológica en secciones 2D terrestre del sector Maniabón-La Farola, utilizando datos geólogos-geofísicos correspondientes al pozo Picanes 1X. CD-ROM VII Convención de Ciencias de la Tierra.
- Prol-Betancourt y Rifá-Hernández**, 2011, Interpretación de los campos potenciales en el sector ciénaga de Majaguillar-Motembo.
- Prol-Betancourt, Rifá-Hernández; Miró-Pagés**, 2016, Ubicación de zonas favorables para la exploración petrolera a partir del estudio de los campos potenciales en el sector Esmeralda, Cuba. Ciencias de la Tierra y el Espacio, vol. 17.
- Rifá-Hernández**, 2012, Ubicación de los sectores elevados de los sedimentos del margen continental en Cuenca Central, Cuba. In Departamento de Geociencias. La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE, p. 73.
- Rifá-Hernández, Prol-Betancourt, Febles-Elejaldes; Fundora-Granda**, 2012, Argumentos geofísicos acerca del margen continental en la Cuenca Central de Cuba. Revista Cubana de Ingeniería, vol. III, no. 3, p. 21-27.
- Shaposhnikova**, 1969, Propiedades Físicas de las Rocas de Cuba. Revista Cubana de Ingeniería Geológica, vol. 7, no. Publicación Especial, p. 80.
- Valencio, Gatti, Mera y Bustos**, 1960, Sobre el esquema estructural de la Isla de Cuba. In Cuba: Archivo del Ceinpet, p. 214.
- Valladares-Amaro, Segura-Soto, Álvarez-Castro, Brey-Del-Rey, Castro-Castiñeira, Rodríguez-Viera, González-Despaigne y Reyes-Paredes**, 2011, Reservorios gasopetrolíferos fracturados de Cuba. Caso de estudio: reservorios carbonatados en la Franja Norte de Crudos Pesados. In

Fecha de recepción: 30 de junio de 2020
Fecha de arbitraje: 13 de febrero de 2021
Fecha de aprobación: 13 de mayo de 2021

Correlación estratigráfica del sector Morro-Cojímar en la Franja Norte de Hidrocarburos de Cuba

Yaimeli Almaguer Álvarez¹, Osmany Pérez Machado Milán†², Lourdes María Pérez Estrada³

¹ *Ingeniera Geóloga. Máster en petróleo. Investigador Agregado. Centro de Investigación del Petróleo, Cuba. Correo electrónico: yaimeli@ceinpet.cupet.cu*

² *Ingeniero Geólogo. Máster en petróleo. Investigador Agregado. Centro de Investigación del Petróleo, Cuba.*

³ *Ingeniera Geóloga. Máster en petróleo. Investigador Agregado. Centro de Investigación del Petróleo, Cuba. Correo electrónico: perezl@ceinpet.cupet.cu*

RESUMEN

El trabajo muestra los aspectos relacionados con la estratigrafía de las secuencias en el sector Morro-Cojímar, Cuba Occidental. Partiendo de la insuficiente caracterización estratigráfica que imposibilita esclarecer el modelo geológico del área y con el objetivo de contribuir al esclarecimiento de la estratigrafía y el modelo geológico de un área que está en evaluación por su importancia productiva a partir de datos de superficie y del subsuelo, se realiza una interpretación y la correlación estratigráfica de siete pozos ubicados en La Cabaña, Habana del Este y Cojímar. Se confeccionaron esquemas de correlación de estas perforaciones recientes, actualización de la columna geológica generalizada del área, con nuevos datos de topes y bases de cada uno de los pozos estudiados. Se lograron nuevos datos estratigráficos y bioestratigráficos que definen mejorar las edades de los diferentes intervalos, que enriquecen los conocimientos sobre su subsuelo. Los resultados que brindan contribuyen a reducir los riesgos de la exploración petrolera. Como resultado se concluyó que, en este sector el reservorio es de tipo Grupo Veloz, representado por una secuencia carbonatada, donde predominan el mudstone calcáreo con una edad Jurásico Superior Tithoniano Superior-Cretácico Inferior. Se establecieron las se-

cuencias o formaciones presentes con mayor exactitud a partir del reestudio de los datos primarios, informes y muestras, lo que conllevó a la realización de una columna geológica generalizada para el área de estudio.

Palabras clave: correlación estratigráfica, correlación bioestratigráfica, modelo geológico, franja norte de hidrocarburos de Cuba

ABSTRACT

The work shows the aspects related to the stratigraphy of the sequences in the Morro-Cojímar sector, Western Cuba. Starting from the insufficient stratigraphic characterization that makes it impossible to clarify the geological model of the area and with the aim of contributing to the clarification of the stratigraphy and the geological model of an area that is being evaluated for its productive importance from surface and subsoil data, An interpretation and stratigraphic correlation of seven wells located in La Cabaña, Habana del Este and Cojímar is carried out. Correlation schemes of these recent drilling were prepared, updating the generalized geological column of the area, with new data of tops and bases of each one of the wells studied. New stratigraphic and biostratigraphic data were obtained that de-

fine improving the ages of the different intervals, which enrich the knowledge about their subsoil. The results they provide contribute to reducing the risks of oil exploration. As a result, it was concluded that, in this sector, the reservoir is of the Veloz Group type, represented by a carbonate sequence, where calcareous mudstone predominates with an Upper Jurassic Upper Tithonian-Lower Cretaceous age. The sequences or formations present with greater accuracy were established from the re-study of the primary data, reports and samples, which led to the realization of a generalized geological column for the study area.

Keywords: stratigraphic correlation, biostratigraphic correlation, geological model, northern strip of hydrocarbons of Cuba

RESUMO

O trabalho mostra os aspectos relacionados à estratigrafia das sequências no setor Morro-Cojímar, oeste de Cuba. A partir da caracterização estratigráfica insuficiente que impossibilita o esclarecimento do modelo geológico da área e com o objetivo de contribuir para o esclarecimento da estratigrafia e do modelo geológico de uma área que está sendo avaliada quanto à sua importância produtiva a partir de dados de superfície e subsolo, É realizada uma interpretação e correlação estratigráfica de sete poços localizados em La Cabaña, Habana del Este e Cojímar. Esquemas de correlação dessas perfurações recentes foram elaborados, atualizando a coluna geológica generalizada da área, com novos dados de topos e bases de cada um dos poços estudados. Foram obtidos novos dados estratigráficos e bioestratigráficos que definem a melhoria das idades dos diferentes intervalos, o que enriquece o conhecimento sobre o seu subsolo. Os resultados que fornecem contribuem para reduzir os riscos da exploração de petróleo. Como resultado, concluiu-se que, neste setor, o reservatório é do tipo Grupo Veloz, representado por uma sequência carbonática, onde predomina o lamito calcário com idade do Jurássico Superior Tithoniano Superior-Cretáceo Inferior. As sequências ou formações presentes com maior precisão foram estabelecidas a par-

tir do reestudo dos dados primários, relatórios e amostras, o que conduziu à realização de uma coluna geológica generalizada para a área de estudo.

Palavras-chave: correlação estratigráfica, correlação bioestratigráfica, modelo geológico, faixa norte de hidrocarbonetos de Cuba

INTRODUCCION

El área de estudio se encuentra enmarcada en La Franja Norte de Hidrocarburos de Cuba (FNHC), ubicada en la costa norte de la provincia La Habana, Constituye una franja que se extiende desde la Bahía de Cabañas, al oeste, hasta Guanabo al este. Se corresponde con el sector marino aledaño a la costa y se extiende hacia el norte hasta cerca de la línea que representa el frente de los cabalgamientos del cinturón plegado y cabalgado cubano (**Figura 1**). La FNHC constituye la principal zona productora de hidrocarburos de Cuba, donde se han explotado yacimientos como Varadero, Boca de Jaruco, Puerto Escondido, Guanabo, entre otros. El aumento de las reservas de este recurso es de importancia estratégica para cualquier nación, por lo que se realizan acciones de exploración hacia el occidente del país, extendiéndose hasta el Morro de La Habana.

En el norte de la provincia de La Habana, se han realizado estudios estratigráficos desde la década de los cuarenta hasta la actualidad. Ejemplos de estos son los artículos de Brönnimann & Rigassi (1963), Albear & Iturralde-Vinent (1983), García-Delgado *et al.* (2001), Gil-González *et al.* (2009). En los últimos años se han perforado más de una decena de pozos en el sector Morro-Cojímar para comprobar objetivos exploratorios revelados por la sísmica.

El método principal de muestreo, empleado en los trabajos de perforación realizados, es a partir de recortes de perforación cada 5 o 10 m, elemento que hace compleja la interpretación estratigráfica del corte perforado. Por esta razón, es de vital importancia la correlación de los estudios de superficie con estos nuevos datos de subsuelo y su integración en un modelo geológico coherente, que ayude a reducir los riesgos de la exploración petrolera en el sector.



Figura 1. Ubicación geográfica del sector Morro-Cojimar de la Franja Norte de Hidrocarburos de Cuba (Tomado de Google Earth).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para obtener los resultados necesarios, se hizo un levantamiento de los materiales primarios, donde se parte de la revisión bibliográfica y se dispone de las bases cartográficas a escala 1:100 000 para la ubicación del área en el marco regional y a escala 1:50 000 para los estudios de campo, información necesaria para poder estudiar las unidades en el campo.

También se contó con numerosos trabajos que aportan información sobre las características del área de estudio de carácter regional, artículos de Gil-González *et al.* (1998) y García *et al.* (2011), así como proyectos de investigación e informes vinculados con la explotación petrolera, de Silvia Valladares *et al.* (1997), Blanco-Bustamante *et al.* (2007) y Brey del Rey *et al.* (2008)

Terminada esta primera parte, se pasó a realizar un exhaustivo análisis de todo el material disponible en el archivo del Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), que permitió la reinterpretación estratigráfica de los pozos LCB-100, HBE-100, HBE-101, COJ-100, COJ-100A, COJ-101L y COJ-200.

La elaboración de columnas litológicas, basada en los porcentajes estimados a partir de las descripciones de muestras de canal, ayuda a una correlación más precisa, donde se muestra de manera gráfica el predominio de diferentes rocas y la posibilidad de litologías «caídas».

Se emplean los registros geofísicos corridos en cada pozo, como por ejemplo el de rayos Gamma, por ser un registro litológico o de composición. De esta manera se pueden correlacionar con rapidez distintos paquetes rocosos y, junto a los datos litológicos y paleontológicos, caracterizar mejor las secuencias atravesadas.

El pozo COJ-100A, a diferencia del resto, contaba con información litológica desde superficie, por lo que se asumió como pozo patrón para la correlación. El intervalo de 395.0 a 477.0 m, fue redescrito desde el punto de vista paleontológico, para confirmar el tope de la Formación Vía Blanca.

Este conjunto de datos permitió conformar una tabla de topes y bases para modificar las columnas de los pozos y, además establecer una columna geológica generalizada y lograr una nueva correlación para el área.

Se realizaron itinerarios geológicos irregulares por el área de trabajo para reconocer las diferentes unidades en superficie. Se caracterizaron las distintas formaciones visitadas, se profundizó su estudio con apoyo de la literatura consultada lo cual ayudó al reconocimiento en el subsuelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área de estudio se enmarca en el bloque de exploración designado por Cuba Petróleo (CUPET) como 7, donde se localizan varios prospectos asociados al cinturón plegado y cabalgado cubano. Desde el 2007, comenzó la perforación con el pozo COJ-100 y ya existen más de 10 pozos de exploración y evaluación en el área. Se utilizaron los informes finales de siete de estos pozos como principal fuente de datos primarios. La **Figura 2**, muestra su ubicación y trayectoria.

Se hizo necesario establecer una correlación entre todos estos pozos seleccionados y conformar una columna geológica generalizada del área, para ayudar a establecer el modelo geológico, un valioso apoyo a perforaciones futuras. Se partió de las columnas originales, que en muchos casos resulta incoherente la información de un pozo a otro, como evidencia la (**Figura 3**). Debido a que las muestras de las secuencias Eoceno Superior al reciente corresponden el tramo del



Figura 2. Mapa de ubicación de los pozos estudiados (Tomado de Geocuba 1:250 000).

tranque de agua, éstas en su mayoría son tomadas aleatoriamente. Por ejemplo, en los pozos de Cojímar, las secuencias del Eoceno al Reciente, no guardan una clara correlación o no se detalla en los informes, aun cuando se ubican a menos de 500 m entre sí (los más distantes).

Hacia abajo, se aprecia una continuidad lateral de rocas serpentiniticas desde La Cabaña hasta Cojímar, las que se interpretan como un paquete serpentinitico continuo. Sin embargo, en el pozo HBE-100 éstas fueron incluidas, al parecer, dentro de la Formación Vega Alta. Otro elemento importante es la identificación del reservorio principal. En estos momentos existen dos tendencias para denominar el reservorio en la FNHC, se denominó como reservorio al Grupo Veloz en el pozo COJ-100A y como reservorio Formación Canasí, en el resto de los pozos. Como muchos de los pozos son dirigidos costa a fuera, para correlacionarlos es necesario tener presente la ubicación espacial de los distintos paquetes, acuíferos en distintas direcciones, etcétera. Se empleó el software Petrel 2008 que facilita la visualización tridimensional de datos.

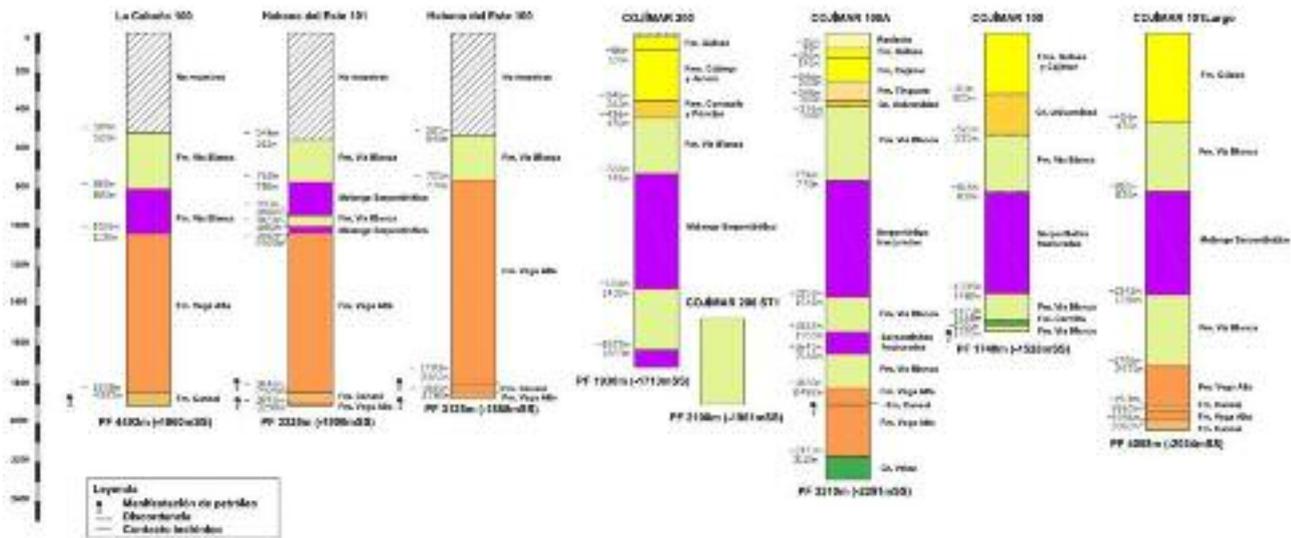


Figura 3. Columnas de siete pozos de exploración y evaluación del área de estudio. Se emplearon los topes y contactos tal y como aparecían en los informes finales de cada pozo.

Es de destacar que, en secciones perforadas de rocas carbonatadas muy porosas y cavernosas del post-orogénico, se producen fuertes pérdidas de circulación y baja recuperación de cortes (ver pozos de Habana del Este y el Cabaña), lo cual es la causa principal del bajo detalle en el muestreo de secuencias jóvenes o muy someras.

En todos los casos, la perforación comienza en carbonatos biogénicos y arrecifales de la Formación Jaimanitas, que aflora en toda la zona costera y de manera

visible en las instalaciones de superficie. Continúa con calizas cristalinas duras, de aspecto sacaroidal, en parte dolomíticas, color crema claro, pertenecientes a la Formación Güines. Seguidas por calizas arcillosas y calizas fosilíferas de la Formación Cojímar con un espesor aproximado de 100-150 m.

Rocas del Oligoceno (Formación Tinguaro) fueron reconocidas solo en el pozo Cojímar-100A, determinado por la siguiente asociación fosilífera: *Globigerina aff ampliapertura*, *Globorotalia mayeri*, *Hasti-*

gerina aequilateralis, *Globoquadrina dehiscens*, *Globigerinoides ruber*, *briozoo*, valva de ostrácodo. En el informe final del pozo se asume la edad Oligoceno, con probables microfósiles caídos desde las rocas del Mioceno. Aunque parece acuñarse, cabe la posibilidad de encontrarse en el resto de los pozos, pero el intervalo de muestreo no fue detallado en este caso.

En los pozos COJ-200, COJ-100 y COJ-100A se describen, en las secuencias hacia abajo, rocas asociadas al Grupo Universidad, con un espesor entre 100 y 120 m. En el pozo COJ-200 se precisa una edad de Eoceno Medio-Superior, Formaciones Consuelo y Príncipe, y no fue posible hacer la división entre ambas. En el pozo COJ-101 no se encontraron fósiles paleogénicos, sin embargo, por registros geofísicos se observa la extensión del mismo paquete presente en los demás pozos.

El registro Gamma suele usarse como herramienta para la correlación, lo que permite la separación de paquetes litológicos (Castro, 2018); combinándolo con las descripciones de *cuttings* y las determinaciones paleontológicas.

La Formación Vía Blanca se describe en todos los pozos con un espesor cercano a los 300 m y caracterizada por un predominio de rocas siliciclásticas, destacándose limolitas, *claystone* (arcilita), arenisca polimíctica a tobácea. Predominan los colores gris y verde claro. Una amplia asociación fosilífera caracteriza esta secuencia como Cretácico Superior Campaniano-Maastrichtiano.

Debajo rocas del Cinturón Ofiolítico del Norte de Cuba, se evidencian en todos los sondeos, describiéndose serpentinitas muy fracturadas, color verde, gris verdoso y negro, en ocasiones alteradas a minerales arcillosos y con elementos subordinados de otras litologías. Las serpentinitas presentan un reflejo evidente en el registro Gamma, muestran valores muy bajos y homogéneos (**Figura 4**).

Se revela muy bien el cambio litológico en este intervalo serpentinitico y la ausencia de fauna es otro elemento característico. Algunos ejemplos:

- Pozo COJ-100A. En el intervalo de 686-762 m se describe: 10-70 % arenisca polimíctica, de granos medios a gruesos, cemento tobáceo, con buena se-

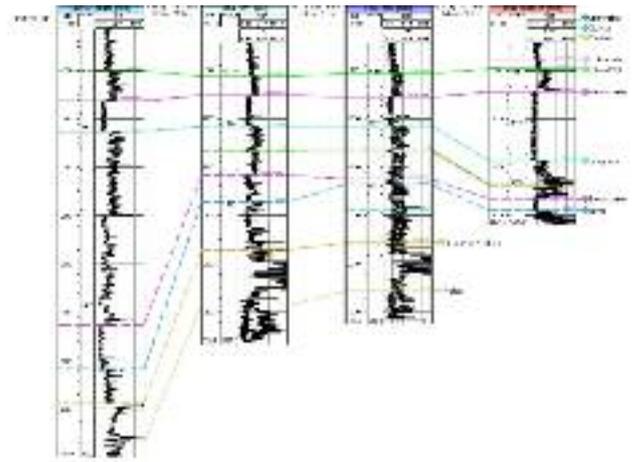


Figura 4. Correlación a partir del registro Gamma. Se distinguen varios paquetes serpentiniticos con una respuesta peculiar en las digraffias.

lección de sus granos, de color gris claro y oscuro, dureza media; 20-40 % arcilla de color gris verdoso, de difícil lavado, no calcárea. A partir de 770 m por litología comienza aparecer serpentinita de 90-100 % de color gris oscuro, con tonalidades azulosas, fracturada, dureza media, alterada, que forma material arcilloso hasta un 50 %.

- Pozo COJ-200. En el intervalo 740-760 m se describe: 100 % de serpentinita de color gris oscuro con tonalidades azulosas, fracturada, dureza media; serpentinita alterada de color gris claro a verde claro.
- Pozo HBE-100. En el intervalo 770-990 m se describe: predominio en más de un 70 % de serpentinitas muy alteradas, se observan minerales del grupo de la serpentinita (crisotilo), limolitas y calcarenitas 20 %, margas 10 % (caídas). Se reportan trazas de pedernal blanco amarillento (770 m). Se observa en los 83 m incremento de arcilita limosa, con fragmentos o restos de serpentinitas en una matriz arcillosa producto de la alteración de las serpentinitas (grauvacas serpentiniticas con matriz arcillosa producto de su alteración).
- Pozo LCB-100. En el intervalo 820-860 m se describe: serpentinita (40-90 %) verde oscuro y negra, fracturada, a veces redondeada, limolitas polimícticas (20-5 %), gris clara, matriz arcillosa, *claystone* (40-5 %) gris claro y pardo, a veces limoso en bloque.

En el pozo HBE-100, se incluye un intervalo serpentinitico (770-1 072 m) de 300 m, dentro de la Formación Vega Alta; este intervalo en los demás pozos fue diferenciado como mélangé serpentinitico o serpentinitas. Aquí se determinó que se corresponde con el mélangé serpentinitico y se correlacionó con el resto del área.

Se asume que en el pozo de Cabaña y en los pozos Habana del Este, el tope de la Formación Vega Alta está en alrededor de los 1 000 m (b.n.m.m); y en los pozos de Cojímar 700-800 m más abajo, con varias repeticiones o imbricaciones de las serpentinitas con la Formación Vía Blanca. La correlación lateral de los paquetes de serpentinitas en el área, es un criterio muy útil (**Figura. 5**).

En el corte, en general, se correlacionan mediante el registro Gamma, dos escamas o cuerpos serpentiniticos, caracterizados además por predominio evidente de serpentinitas. El superior consta de hasta 600 m de espesor aparente y el inferior es de menores proporciones (200 m máximo). El tope de la Formación Vega Alta en Habana del Este se ubicó por encima del segundo paquete serpentinitico, mientras que en Cojímar por debajo del mismo (**Figuras 3 y 5**).

Para solucionar este problema se revisaron los argumentos que conducen a definir el tope de la Formación Vega Alta en ambos casos, y las características de la segunda y tercera escama de la Formación Vía Blanca, en los pozos Cojímar.

Los geólogos de pozo no cuentan, por lo general, con datos paleontológicos durante el proceso de

perforación. De manera empírica, se han usado algunos indicadores de cambio, que apuntan a la entrada en secuencias de la Formación Vega Alta. Se calibra el tope dado por los registros geofísicos y los estudios paleontológicos. Algunos de estos indicadores son:

- Aparición de pedernales varicolores y aumento de su proporción de manera progresiva.
- Cambio a una secuencia muy arcillosa, que se traduce como una disminución considerable de la velocidad de perforación.
- Secuencias conglomeráticas, con muchos fragmentos de distintos litotipos de calizas (estos fragmentos arrojan edades de Cretácico Medio, Jurásico Superior-Neocomiano, Campaniano Maastrichtiano o más joven).
- Abundante pedernal: Pozo HBE-101, en el intervalo 1 085-1 090 m se describe: 15 % calizas microcristalinas grises, cremas, blancas; 30 % pedernales negros, verde, algunos arcillosos; 40 % claystone gris oscuro poco calcáreo; 10 % limonitas polimícticas de matriz arcillosa, gris clara. Más abajo se mantiene la presencia de estos pedernales en un 10 %.
- En los dos pozos de Habana del Este se describen secuencias conglomeráticas, muy carbonatadas y con abundantes fragmentos de serpentinitas.

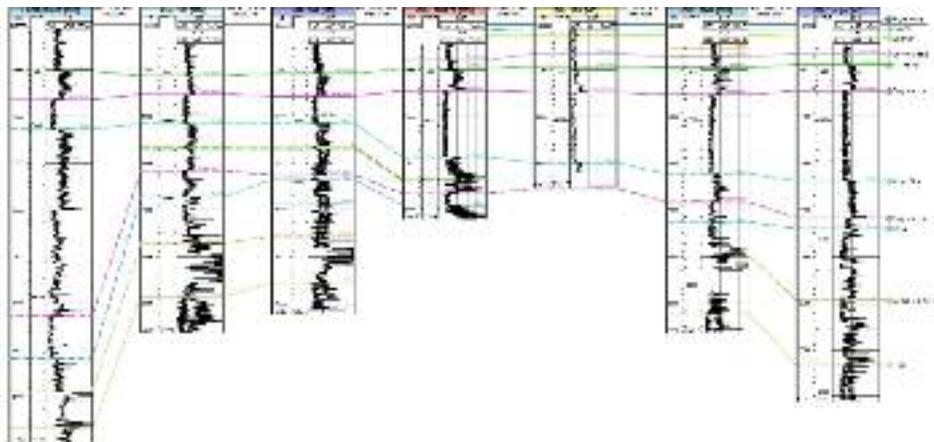


Figura 5. Correlación a partir del registro Gamma de paquetes serpentiniticos en los siete pozos estudiados.

Las descripciones apuntan a una secuencia conglomerática polimíctica, con predominio de fragmentos de serpentinitas, carbonatos, pedernales, con matriz areno-arcillosa o limosa. En ocasiones, se trata de olistostromas, como los descritos en innumerables levantamientos de superficie en Cuba Central (For-

mación Vega Alta) y Pinar del Río (Formación Manacas). En el ambiente geológico del área esto es característico, pues se trata del frente de los cabalgamientos de las rocas del Complejo Ofiolítico sobre el Margen Continental de América del Norte (**Figura 6**).

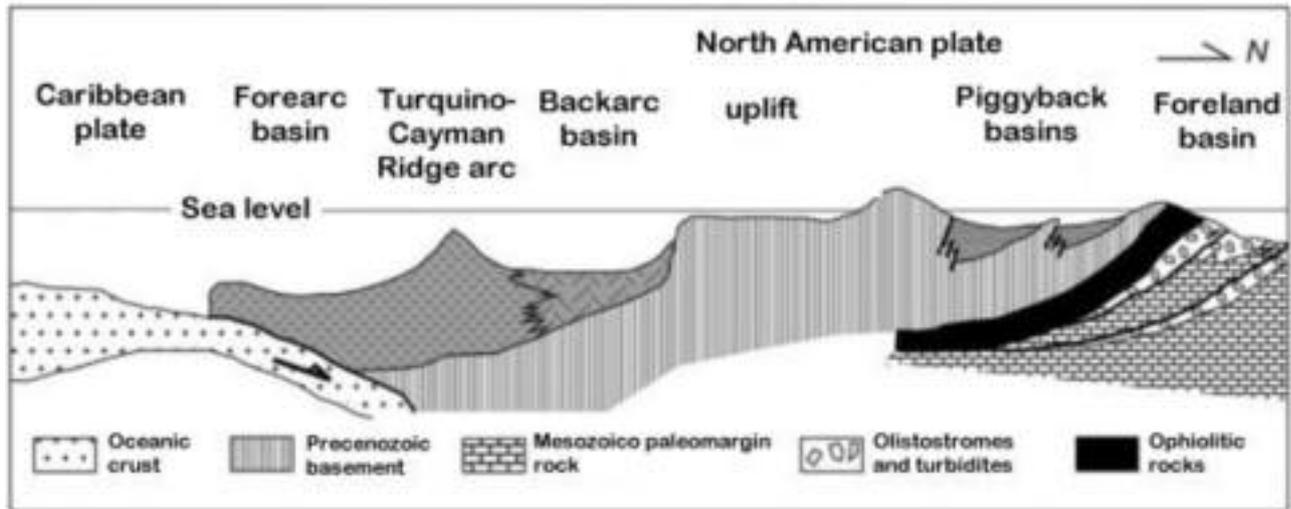


Figura 6. Perfil paleotectónico conceptual del Paleoceno–Eoceno Medio parte baja (Cobiella–Reguera, 2009). Obsérvese en el extremo norte del perfil las secuencias olistostrómicas que se asocian a la Formación Vega Alta.

Al analizar los intervalos asumidos como Formación Vía Blanca en los pozos de Cojimar, por debajo de 1 400 m se observan dos elementos importantes: ausencia o escasez de determinaciones paleontológicas, y descripciones litológicas que se alejan de las típicas de esta formación. Las únicas determinaciones fueron de edad Cretácica, esto pudo influir en gran medida en la división estratigráfica. El pozo COJ-200, cuenta con más determinaciones, en muchos casos parece tratarse de fragmentos de la Formación Carmita, por su composición y edad Cretácico Medio, además de un predominio de carbonatos, serpentinitas y pedernales en las descripciones atribuidas a la Formación Vía Blanca.

En los trabajos de superficie (Brönnimann y Rigassi, 1963; Albear e Iturralde-Vinent, 1983) se describen varios tipos de conglomerados con fragmentos de calizas y serpentinitas, pero no en tan alta proporción, y en ningún caso, se describen fragmentos o capas de pedernales.

Por lo antes mencionado, y con un mismo criterio en todos los pozos, se tomó como tope de la Formación Vega Alta la base de las rocas del Cinturón Ofiolítico, evidenciado por la primera escama. Se asume entonces por debajo de las serpentinitas una secuencia conglomerática, con probabilidad de ser hasta olistostrómica. Varios cuerpos menores u olistolitos de serpentinitas pudieran definirse como parte de esta, aunque solo uno correlacionable en todos los pozos. La presencia de bloques u olistolitos en la Formación Vega Alta es conocida en muchos afloramientos (Morales *et. al.*, 2012).

Por lo general, cuando se describe la Formación Vega Alta en la FNHC, se trata de una secuencia arcillosa (unidad sello), subordinada a otra carbonatada, con intercalaciones de variedades de pedernal, pero en muchos casos se excluye la parte olistostrómica, desarrollada con amplitud en superficie (Cuba Central), y que se reconoce también en los pozos estudiados. Si se compara con secuencias similares de

Cuba Occidental se observa gran similitud con la Formación Manacas (Miembro Olistostroma Vieja y Miembro Pica Pica).

En el área de la Cabaña-Habana del Este, el reservorio es de tipo Grupo Veloz, al igual que en Cojímar, que se describen calizas (en un 60-80 % como promedio) color crema, blanco, bandeadas, en secciones delgadas mudstone calcáreo o wackestone; peder-nales negros, ámbar y pardos en menor proporción, así como intercalaciones arcillosas; además de la abundancia de fauna de edad Jurásico Superior–Neocoma-miano. Se caracteriza como un colector carbonatado, fracturado-poroso y se relacionan algunos ejemplos de la litología y edad de la secuencia del reservorio:

Pozo COJ-100A

- 3 145 m: Mudstone calcáreo/wackestone bioclástico, recristalizado algo arcilloso. a) Nannoconus s.l. (Jurásico Superior Titoniano alto- Cretácico Inferior), b) Nannoconus s.l., calpionélidos, radiolarios recristalizados (Jurásico Superior Titoniano alto-Cretácico Inferior Valanginiano).

- 3 165 m: Mudstone calcáreo, recristalizado impregnado y piritizado. Nannopláncton calcáreo recristalizados, Nannoconus s.l. (Jurásico Superior Titoniano alto-Cretácico Inferior).

Pozo HBE-100

- 2 965 m: Packstone intraclástico con matriz carbonatada friable (abundantes cocolitos), mudstone calcáreo impregnado, moldes de radiolarios, cocolitos abundantes, calpionélidos s.s. (Jurásico Superior Titoniano alto-Cretácico Inferior Valanginiano).

Pozo HBE-101

- 3 150 m: Mudstone calcáreo recristalizado, impregnado, calpionélidos s.s. (recristalizados). (Tithoniano Superior-Cretácico Inferior, Valanginiano).
- 3 180 m: Wackestone bioclástico, calpionélidos s.s. (recristalizados). (Tithoniano Superior-Cretácico Inferior, Valanginiano).

Pozo	Tope y Base (MD)	Tope (SS)	Formación
La Cabaña 100	0-540 520-820 820-1 130 1 130-4 325 4 330-4 593	-499 -796 -1 025 -1 839	----- Vía Blanca Melange serpentinitico Vega Alta Veloz
Habana del Este 101	0-561 561-760 760-1 079 1 079-2 928 2 925-3 290 3 290-3 325	-546 -743 -1 023 -1 843 -1 893	----- Vía Blanca Melange serpentinitico Vega Alta Veloz Vega Alta
Habana del Este 100	0-561 534-776 776-1 075 1 075-2 402 2 402-3 125	-519 -761 -1026 -1843	----- Vía Blanca Melange serpentinitico Vega Alta Veloz
Cojímar 200	0-77 77-133 133-389 389-480 480-720 720-1 430 1 430-2 100	13 -64 -120 -376 -467 -704 -1 311	Jaimanitas Güines Cojímar Consuelo + Príncipe Vía Blanca Melange serpentinitico Vega Alta

Cojímar 100 A	0-55	13	Jaimanitas
	55-125	-41	Güines
	125-260	-111	Cojímar
	260-355	-246	Tinguaro
	355-390	-341	Universidad
	390-763	-378	Vía Blanca
	763-1607	-749	Melange serpentinitico
	1 607-3 111	-1 336	Vega Alta
	3 111-3 310	-2 174	Veloz
Cojímar 100	0-49	13	Jaimanitas
	49-133	-36	Güines
	133-325	-120	Cojímar
	325-463	-311	Universidad
	463-737	-450	Vía Blanca
	737-1 493	-724	Melange serpentinitico
	1 493-1 740	-1 345	Vega Alta
Cojímar 101L	0-55	15	Jaimanitas
	55-137	-40	Güines
	137-325	-122	Cojímar
	325-444	-310	Universidad
	444-723	-429	Vía Blanca
	723-1 691	-707	Melange serpentinitico
	1 691-3 665	-1 316	Vega Alta
	3 665-3 730	-1 918	Veloz
	3 730-3 875	-1 920	Veja Alta
	3 875-4 058	-1 922	Veloz

Tabla 1. Topes y bases a partir de la nueva correlación estratigráfica.

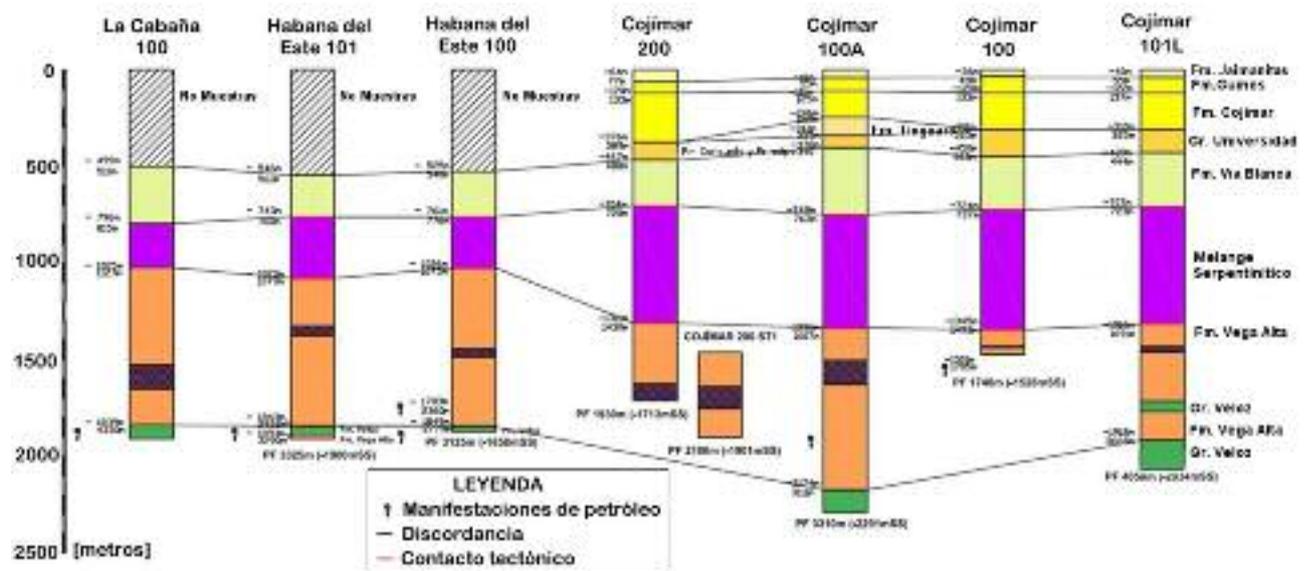


Figura 7. Esquema de correlación final de los pozos estudiados.

Pozo LCB-100

- 3 665 m: Mudstone calcáreo algo arcilloso impregnado a) radiolarios bien preservados (Jurásico Superior Titoniano Superior-

Cretácico Inferior, Valanginiano. b) Nannoconus sl (Jurásico Superior Titoniano Superior-Cretácico Inferior).

Después de este análisis se redefinieron los topes en cada pozo (**Tabla 1**) y se obtuvo una correlación las secuencias en toda el área estudiada (**Figura 7**). Ade-

más, se confeccionó la columna geológica generalizada del sector Morro-Cojímar (**Figura 8**).

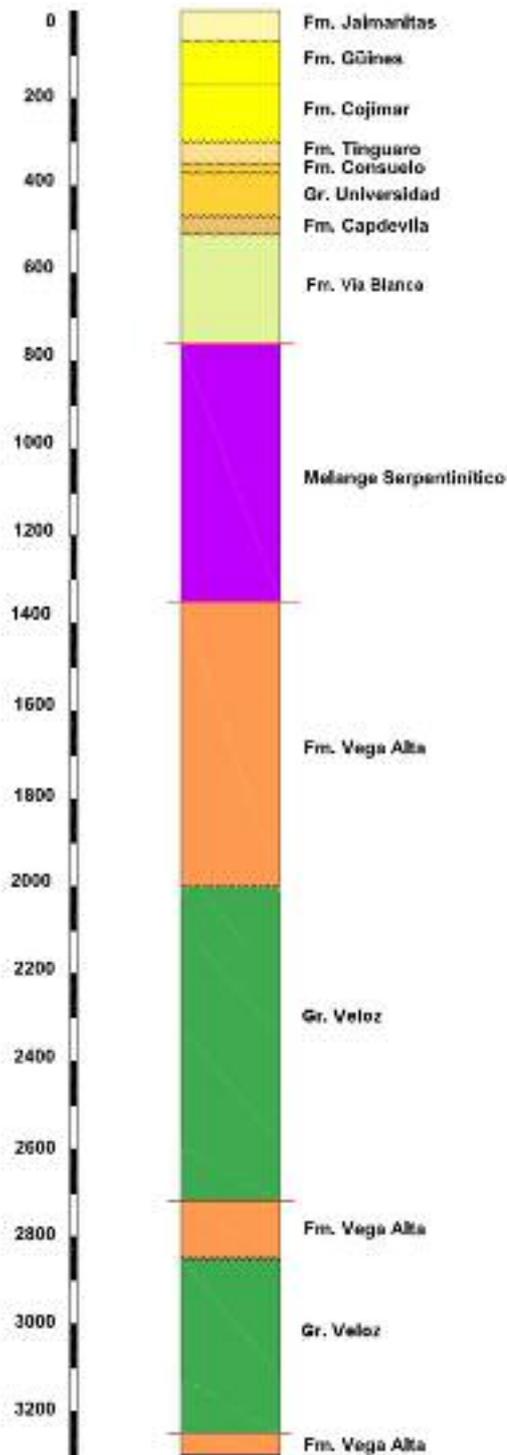


Figura.8. Columna geológica generalizada del sector Morro-Cojímar de la Franja Norte Hidrocarburos de Cuba.

CONCLUSIONES.

Como resultado del estudio detallado de los pozos en La Cabaña, Habana del Este y Cojímar, se obtuvo una nueva división del corte estratigráfico en cada uno de ellos y se logró una mejor correlación entre los pozos estudiados. Las unidades estratigráficas observadas en el subsuelo mostraron características muy similares a las descritas en superficie.

La edad Oligoceno asignada a la Formación Tinguaro se determinó solo en el pozo Cojímar-100A por lo que no se descarta que, a partir de un muestreo de mayor detalle, se establezca una continuidad con el resto de los pozos de esta secuencia cenozoica.

Se determinó la existencia del *mélange* serpentiniticos en el pozo HBE-100, en el intervalo de 770 m a 1 072 m, por datos litológicos y registros geofísicos, lo cual permitió correlacionarlo con el resto de los pozos estudiados.

Se concluye que, en este sector, el reservorio es de tipo Grupo Veloz, representado por una secuencia carbonatada, donde predominan el *mudstone* calcáreo con una edad Jurásico Superior Tithoniano Superior-Cretácico Inferior.

Se establecen las secuencias o formaciones presentes con mayor exactitud a partir de la reelaboración de los datos primarios, informes y muestras, lo que conllevó a la realización de una columna geológica generalizada para el área de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albear, J. F.; Iturralde-Vinent, M., 1983, Estratigrafía de las provincias de La Habana, En: Contribución a la Geología de las provincias de La Habana y Ciudad de La Habana: Editorial Científico Técnica, La Habana, 12-54.

Blanco-Bustamante, S.; Brey Del Rey, D.; Castro-Castiñeiras, O.; Pérez-Estrada, L., 2007, Consideraciones faciales de la Formación Amaro en el yacimiento de Boca de Jaruco: En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias. La Habana, Cuba. ISBN 978-959-7117-16-2, SCG.

Brey-Del Rey, D.; Blanco-Bustamante, S.; Aguilar-

Sánchez, A.; Gil-González, S.; García-Delgado, D.; Pérez-Estrada, L.; Morales-Echevarría, C.; Medina, A.; Flores-Nieves, A.; Castro-Castiñeira, O.; Rodríguez-Martínez, M.; Villavicencio, B.; Sotolongo, A.; Rodríguez-Loeches, J.; Mejías-Rodríguez, L.; Pezera-Falcón, C.; Menéndez L.; Laguardia R.; Lazcano-Véliz, Y., 2008, Proyecto 2801: Sedimentos sinorogénicos asociados a la franja norte de Cuba y su relación con los sellos y reservorios-Etapa 1: Estudiar, precisar y definir los cambios litofaciales y biofaciales de los diferentes sedimentos sinorogénicos de la Franja Norte de Cuba y sus características como sello y reservorio. Archivo Técnico Centro de Investigación del Petróleo. La Habana, Cuba (Versión digital).

Brönnimann, P.; Rigassi, D., 1963, Contribution to the geology and paleontology of the area of the city of La Habana, Cuba and its surroundings. *Eclog. Geol. Helv.* 56(1):193-430.

Castro-Castiñeiras, O. 2018, Evaluación petrofísica de formaciones gasopetrolíferas cubanas, Archivo Técnico Centro de Investigación del Petróleo. La Habana, Cuba. ISBN 978-959-7117-55-1.

Cobiella-Reguera, J. L., 2009, Emplacement of the northern ophiolites of Cuba and the Campanian-Eocene geological history of the northwestern Caribbean-SE Gulf of Mexico region, Geological Society, London, Special Publication 328: 315-338.

García-Delgado, D.; Delgado, R.; Millán, G.; Rojas, Y.; Peñalver, L.; Cabrera, M.; Padilla, I.; Díaz, C.; Torres, A.; Furrázola, G.; Llanes, A.; Torres, M.; Pérez, R.; Bernal, L.; Morales, R.; Pérez, C.; Stracevich, V.; Pérez, R.; García, I.; Batista, R.; Rodríguez, L.; Triff, J. & Ugalde, C., 2001, Informe proyecto 216: Generalización y actualización geológica de la región Habana-Matanzas. Escala 1:100 000. Archivo Técnico Centro de Investigación del Petróleo. La Habana, Cuba (Versión digital).

García-Delgado, D. E.; Pérez-Estrada, L.; Blanco-Bustamante, S. & García, Y., 2011, La Formación Vega Alta en la región occidental de Villa Clara, correlación con el sello de la Franja Norte de Crudos Pesados. En IX Congreso Cubano de Geología. Memorias Geociencias. La Habana, Cuba. ISBN 978-959-71119-30-8 S.C.G.

Gil-González, S.; Echeverría-Hernández, B.; Torres-Silva, A. I. & García-Delgado, D., 1998, Estudio Cuantitativo de la Composición Bioclástica de los Depósitos del Maastrichtiano Superior de la Sierra del Rosario, Cuba Occidental, Geología y Minería'98. Memorias. La Habana, Cuba, 301-303.

Gil-González, S.; García-Delgado, D. & Díaz-Otero, C., 2009, «Formaciones del Maastrich-

tiano Superior en Cuba Occidental y Central. Composición bioclástica y Litofacies». En: Memorias de la III. Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba. ISBN 959-234-059-5.

Valladares, S.; García, R. & Brey, D., 1997, Reservorios carbonatados pertenecientes a la Unidades Tectonoestratigráficas. Placetas. Etapa I. Archivo Técnico Centro de Investigación del Petróleo. La Habana, Cuba.

Fecha de recepción: 27 de abril de 2021

Fecha de arbitraje: 6 de mayo de 2021

Fecha de aprobación: 14 de julio de 2021





A través de la Coordinación Editorial

CONVOCA

A profesores, investigadores, centros de investigación, alumnos universitarios nacionales y extranjeros, profesionistas y empresas relacionadas con los ámbitos cultural y académico a niveles nacional e internacional, a postular sus artículos originales para su publicación en nuestra revista *Geociencias UO*, de acuerdo con las siguientes bases:

- 1** Todos los artículos deben ser originales, no haber sido publicados antes y deben estar en idioma español, pueden ser uno o más autores.
- 2** Deberán observar las normas editoriales disponibles para su consulta en: <https://geocienciasuo.olmeca.edu.mx>
- 3** Los trabajos se reciben en formato Word que permita modificaciones; deben ser enviados a: editorial@olmeca.edu.mx
- 4** Los postulantes deberán aceptar el proceso de arbitraje y en su caso realizar las correcciones necesarias en tiempo y forma para ser incluidos.
- 5** La revista tiene periodicidad semestral.

Mayores informes:
Coordinación Editorial

📞📧 uolmeca | olmeca.edu.mx | +52(993)187 9700 Ext. 1141

Carretera Villahermosa-Macuspán km 14, Poblado Dos Montes, C.P. 86280, Centro, Tabasco, México

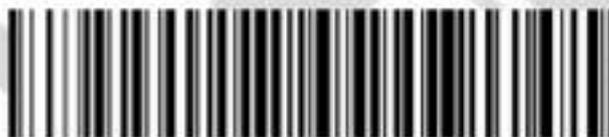


UNIVERSIDAD OLMECA

Raíz de sabiduría

<https://geocienciasuo.olmeca.edu.mx>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2783-2248>



ISSN-2683-3174