

Análisis de registros geofísicos y propiedades petrofísicas de la secuencia del anillo de picos del cráter Chicxulub

José Alfredo Torres-Acosta^{1,2,*}, Jaime Urrutia-Fucugauchi^{1,2,3} y Juan Araujo-Mendieta^{2,4}

¹ Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04150, Ciudad de México, México.

² Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04150, Ciudad de México, México.

³ Instituto de Investigación y Estudios Avanzados Chicxulub, Mérida 097302, Yucatán, México.

⁴ Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas 152, 07730, Ciudad de México, México.

* jose.alfredo.ta@gmail.com

RESUMEN

Se propone un modelo petrofísico del pozo M0077A con base en el estudio de registros geofísicos de pozos. Los siguientes registros analizados son: resistividad y conductividad eléctrica, susceptibilidad magnética, densidad, radiactividad natural y factores mecánicos del pozo. El pozo M0077A fue perforado en la Expedición 364 del proyecto de perforación marina del cráter Chicxulub, con el propósito de investigar el anillo de picos del cráter. La información de los registros geofísicos del pozo revela propiedades físicas de las rocas, tales como alta porosidad, bajas densidades y velocidades sísmicas. Esta combinación de características específicas se asocia a microfracturamiento y alteración, lo cual registra la deformación debido al impacto y formación del cráter. Estos resultados son consistentes con las predicciones del modelo para la formación del anillo de picos, establecen cuales litologías representan las rocas impactadas y deformadas, integradas principalmente por brechas de impacto y granitoides del basamento fracturados. La interpretación de los registros del pozo define tres principales unidades litoestratigráficas en el pozo M0077A: (a) sedimentos post impacto (0–616.58 m), (b) impactitas (617.33–747.02 m) y (c) basamento granítico (747.2–1334.27 m). La caracterización petrofísica se elaboró a partir del análisis del pozo M0077A, y se basa en información de otros pozos y de modelos geológicos–geofísicos del cráter Chicxulub.

Palabras clave: cráter Chicxulub; Anillo de picos; modelo petrofísico; registros geofísicos; Pozo M0077A; Yucatán.

ABSTRACT

In this study we propose a petrophysical model of well M0077A based on the geophysical well logs. The following logs analyzed are: resistivity and electrical conductivity, magnetic susceptibility, density, natural radioactivity and mechanical factors of the well. The M0077A well was drilled on Expedition 364 of the Chicxulub Crater offshore drilling project, with the purpose of investigating the crater's peak ring.

Information from the geophysical well logs reveals physical properties of the rocks, such as high porosity, low densities and seismic velocities. Such combination of specific characteristics is associated with microfracturing and alterations, which record the deformation due to the impact and crater formation. These results are consistent with the model predictions for the formation of a peak ring, established which lithologies represent the impacted and deformed rocks, composed mainly of impact breccias and fractured basement granitoids. The interpretation of well logs defines three main lithostratigraphic units in well M0077A: (a) post-impact sediments (0–616.58 m), (b) impactites (617.33–747.02 m), and (c) granitic basement (747.2–1334.27 m). The petrophysical characterization was prepared from the analysis of the M0077A well, and is based on information from other wells and geological-geophysical models of the Chicxulub crater.

Key words: Chicxulub crater; peak ring; petrophysical model; geophysical logs; M0077A; Yucatán.

INTRODUCCIÓN

El cráter Chicxulub es uno de los cráteres de impacto de mayor tamaño y mejor preservado descubierto a la fecha en nuestro planeta. Debido a que la estructura del cráter se encuentra sepultada bajo depósitos sedimentarios con espesores de cientos de metros, las investigaciones han requerido de diferentes métodos directos como perforación de pozos, e indirectos como métodos geofísicos y campañas de adquisición sísmica que permitan recopilar información para estudiar el cráter (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1996, 2011). Las exploraciones recientes incluyen el programa de perforación marina en el sector central de la estructura, y han estado orientadas principalmente al estudio de: (1) la naturaleza y formación del anillo de picos; (2), las características morfológicas y estructurales del cráter; y (3) los efectos ambientales, de la biota y paleoclimáticos. Para este trabajo, se utilizó la información recabada por la Expedición 364 IODP-ICDP. Durante esta exploración se perforó el pozo M0077A (Chicx-03A). Durante la perforación se adquirieron registros geofísicos

de pozo, con los cuales, se propone realizar un análisis y caracterización petrofísica de la secuencia del anillo de picos del cráter Chicxulub. Los registros geofísicos de pozo son mediciones de las variaciones de las propiedades físicas de las rocas contra la profundidad. Los registros geofísicos constituyen una herramienta básica en los proyectos de perforación en la industria y academia (Busch *et al.*, 1987; Lai *et al.*, 2022). Existen diferentes tipos de registros, los cuales están en función de las propiedades físicas que medirán. Proporcionan datos directos durante la perforación y son fundamentales para la delimitación de las litologías y sus características. Al contar con registros geofísicos que miden diferentes propiedades, suelen tomarse un conjunto de registros diferentes al mismo tiempo para correlacionar la información obtenida entre ellos y realizar una evaluación más confiable y certera de las formaciones atravesadas. La toma de registros suele ser una operación técnica y útil en los programas de perforación y en la recuperación de núcleos y muestras.

ÁREA DE ESTUDIO

El cráter de impacto Chicxulub se localiza en la plataforma de Yucatán. La plataforma de Yucatán se encuentra en el sector sur del Golfo de México, la zona emergida constituye la Península de Yucatán y parte de los estados de Campeche, Chiapas, Tabasco y Quintana Roo en México, así como porciones terrestres del noroeste de Belice y el norte de Guatemala. Tiene una extensión aproximada de 300000 km² y se sitúa geográficamente en las latitudes 16°–24°N y longitudes 86°–92.5°W (Figura 1). Los estudios geológicos de la Plataforma de Yucatán son escasos en su conjunto, pues se enfocan principalmente

en el análisis del cráter. Algunas de las primeras investigaciones sobre la plataforma fueron realizadas por Petróleos Mexicanos (PEMEX), que llevó a cabo actividades exploratorias con el fin de encontrar hidrocarburos a partir de la década de 1950, mismas que, más tarde, serían las que descubrirían la estructura del Chicxulub (Penfield y Camargo-Zanoguera, 1981).

Cráter Chicxulub

El cráter Chicxulub se localiza al sur del Golfo de México y en el borde septentrional de la Península de Yucatán (N21°20'; W89°30'; centro nominal del cráter). La porción sur del cráter, casi exactamente la mitad, se halla en tierra, mientras que la porción norte se encuentra sumergida en el Golfo de México. El centro geométrico del cráter se sitúa cercano al Puerto de Chicxulub, motivo por el cual se le nombró así a ésta estructura de impacto (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2011).

Expedición 364 IODP

De abril a mayo del 2016, el Programa Internacional de Descubrimiento de los Océanos (IODP) y el Programa Internacional Continental de Perforación Científica (ICDP) llevaron a cabo conjuntamente la Expedición 364, en la cual perforaron el pozo M0077A para llegar al anillo de picos del cráter Chicxulub (Morgan *et al.*, 2016; Gulick *et al.*, 2017a) (Figura 2).

Pozo M0077A

El pozo M0077A (Chicx-03A) se perforó en la costa norte de la Península de Yucatán a 30 kilómetros al noroeste de Puerto Progreso; se sitúa geográficamente en la latitud 21°27.009'N y

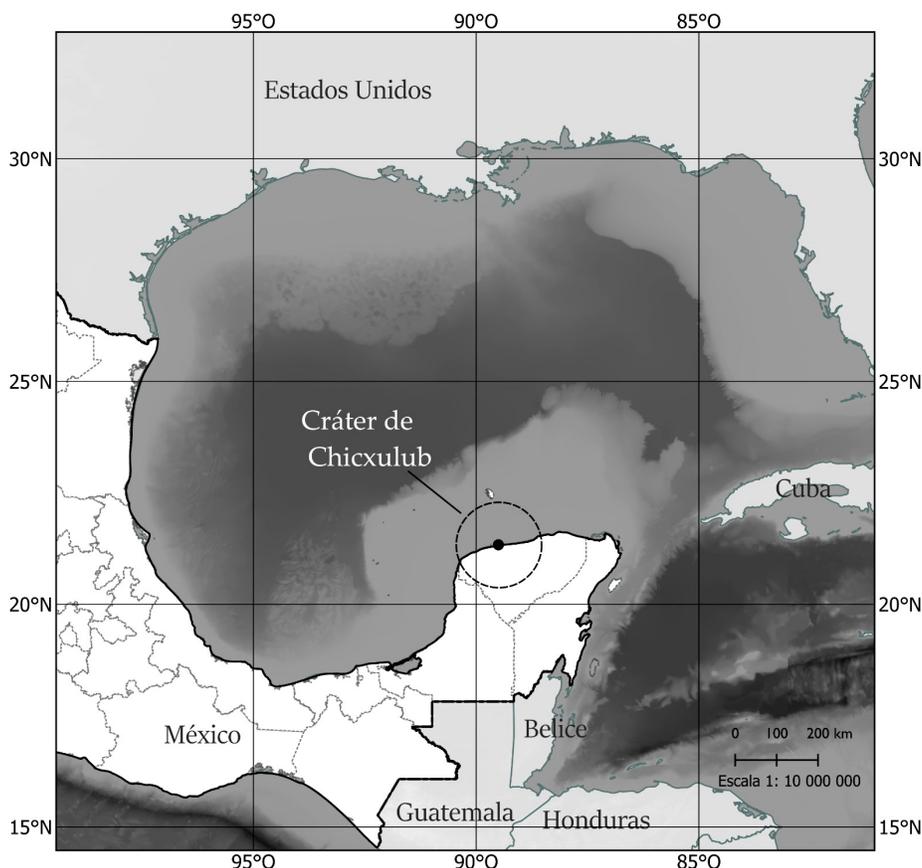


Figura 1. Localización del cráter de impacto Chicxulub en la Península de Yucatán.

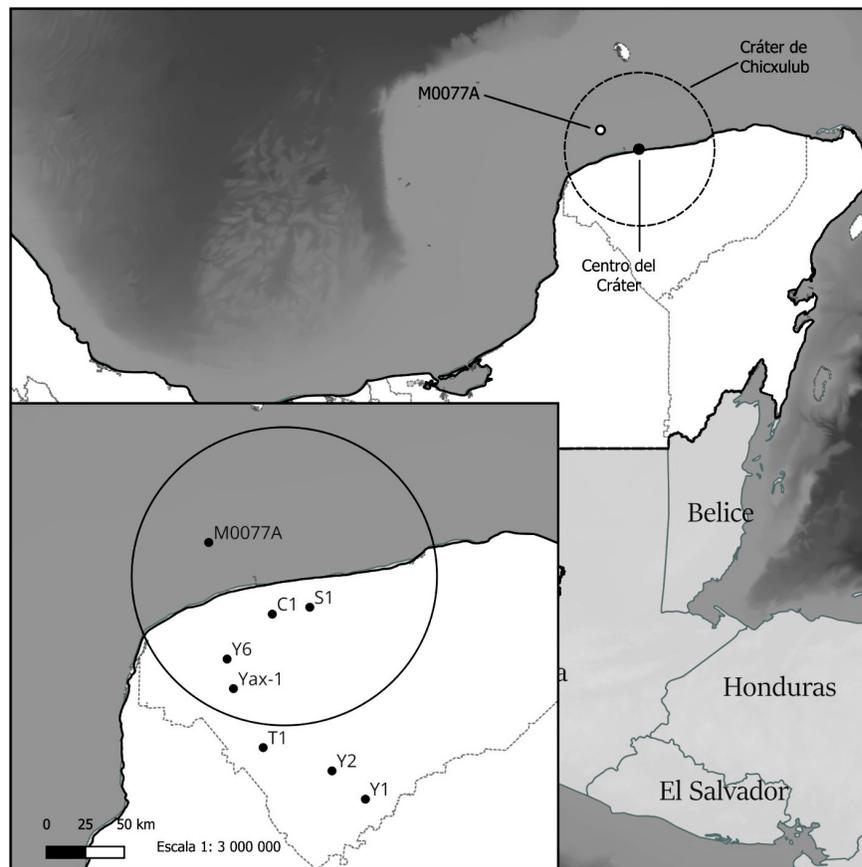


Figura 2. Localización del pozo M0077A. A la derecha se muestra su ubicación respecto a los pozos Sacapuc-1 (S1), Chicxulub-1 (C1), Yucatán-6 (Y6) y Yaxcopoil-1 (Yax-1); también se presentan los pozos Ticul-1 (T1), Yucatán-2 (Y2) y Yucatán-1 (Y1), perforados en las inmediaciones del cráter.

longitud $89^{\circ}56.962'W$ (Figura 2). El sitio de perforación de este pozo se determinó con base en los conjuntos de datos sísmicos adquiridos en 1996 y 2005 que tomaron imágenes del anillo de picos (Morgan *et al.*, 2016). El pozo se perforó en un tirante de agua de 19.8 metros y tiene una profundidad total de 1334.69 metros (Gulick *et al.*, 2017b), de la cual se recuperaron 839.51 metros de muestras de roca (núcleos), obtenidos principalmente de 505.7 a 1334 metros de profundidad; y se midieron 1334.4 metros con registros geofísicos (Lofi *et al.*, 2018).

ANÁLISIS DE LOS REGISTROS GEOFÍSICOS DEL POZO M0077A

El conjunto de los registros geofísicos de pozo fue determinado por los objetivos científicos de la Expedición 364, los cuales también definieron la técnica de perforación y extracción de núcleos utilizada, y las condiciones mecánicas del pozo durante las operaciones de su construcción (Gulick *et al.*, 2017b; Lofi *et al.*, 2018) (Figura 3).

Se midieron un total de seis parámetros: resistividad eléctrica (somera y profunda), velocidad de onda P, conductividad eléctrica, susceptibilidad magnética, rayos gamma y contenidos de uranio, potasio y torio. Este grupo de datos revela la información necesaria para detallar las variaciones relacionadas con las propiedades físicas de las diferentes litologías, orientación de las estructuras geológicas, propiedades elásticas de las rocas y geometría del pozo. La toma de registros se llevó a cabo en tres etapas: (1) intervalo superior de 0–503 metros, (2) intervalo medio de 506–699 metros e (3) intervalo inferior de 700–1334 metros (Morgan *et al.*, 2016; Lofi *et al.*, 2018).

MÉTODOS

Una vez obtenidos los datos de los registros geofísicos del pozo, se realizó una descripción general de cada medición. Luego, se realiza un examen gráfico y numérico para dividir los registros en diferentes unidades que posean el mismo comportamiento, es decir, que tengan un rango de valores semejante. Una vez identificadas estas unidades se les efectúa un análisis estadístico particular para obtener los estadígrafos necesarios para su evaluación cualitativa y definir las litologías detectadas por los registros, pues cada unidad representa una capa distinta o una variación estructural. Con estos métodos, además de determinar el número y tipo de litologías halladas, se pueden identificar perfiles de concordancia entre el conjunto total de los registros, lo cual posibilita la caracterización petrofísica del pozo M0077A. El primer paso para la interpretación, fue describir los registros y las propiedades petrofísicas que miden, ya que éstas determinan la naturaleza de las formaciones que se encuentran, pues cada una tiene valores distintivos de porosidad, permeabilidad, radiactividad, resistividad y saturación de fluidos, características que permiten identificar los tipos de roca de las diferentes unidades de cada registro.

Registro de resistividad somera (Rxo)

El registro de resistividad somera tiene una variación muy baja en los promedios de sus tres unidades, lo cual nos indica que existe una sola litología dominante. Los intervalos Rxo_{U1} y Rxo_{U3} presentan resistividades de 3.96 y 2.82 $\Omega\cdot m$ respectivamente, promedios muy aproximados entre sí y que sobresalen con respecto de la segunda unidad, Rxo_{U2} , la cual posee una resistividad media de 1.98 $\Omega\cdot m$, siendo

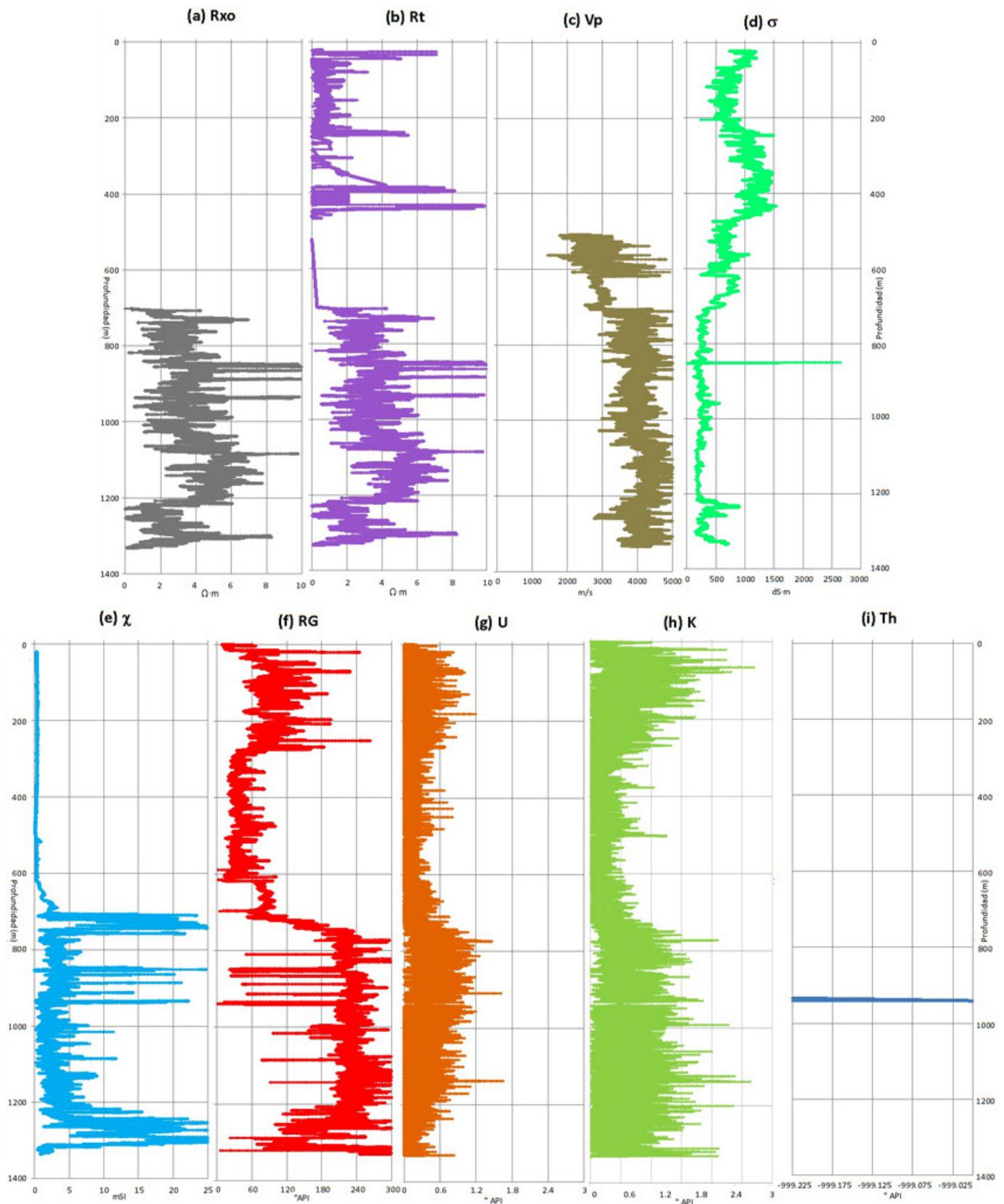


Figura 3. Síntesis de los registros geofísicos del pozo M0077A: (a) y (b) son de resistividad somera y profunda respectivamente; (c) velocidad de onda P; (d) conductividad eléctrica; (e) susceptibilidad magnética; (f) rayos gamma; (g), (h) e (i) muestran los contenidos de uranio [U], potasio [K] y torio [Th] correspondientemente

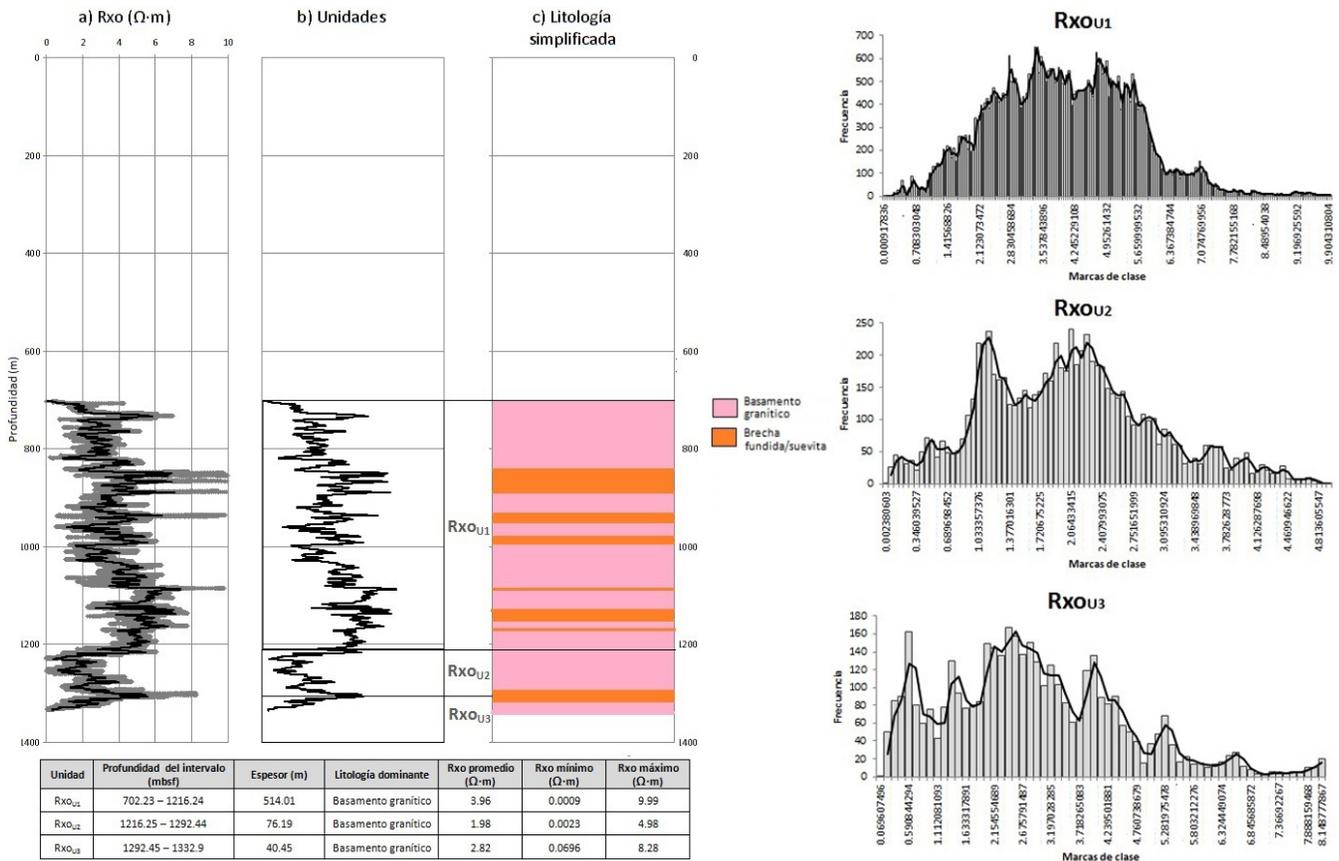


Figura 4. Interpretación petrofísica del registro de resistividad somera (Rxo): (a) registro con media móvil, (b) límites de las unidades litológicas y (c), litología simplificada.

el intervalo que tiene las mediciones más bajas. Estas resistividades muestran valores consistentes al del basamento granítico (Marin, *et al.*, 2001). Sin embargo, este registro se dividió en tres unidades litológicas posibles debido a que la primera y la tercera unidad presentan picos de valores máximos, a diferencia de la segunda unidad, la cual no tuvo ningún incremento abrupto de resistividad. Estos picos indican breves cambios litológicos dentro de la litoestratigrafía dominante, así que las resistividades máximas señalan la presencia de diques, los cuales pueden ser de brechas de impacto. El registro de resistividad somera no presenta valores en el parte superior del agujero, de 0 a 700 metros, debido a problemas surgidos por el estado mecánico del pozo. En el intervalo de 0 a 400 metros el M0077A presenta condiciones de pozo imperfectas como forma elíptica del agujero e irregularidades en el tamaño de su diámetro debido a la presencia de karst en esta profundidad, factores que afectaron la recuperación y calidad general de los datos obtenidos por las herramientas de resistividad profunda (DLL3, *double laterolog*, permite leer curvas de Rxo y Rt) y la acústica (ABI40, *sónico de amplitud*, su objetivo es medir la porosidad), pues la toma de registros del pozo se hizo en condición de agujero descubierto. Y de 400 a 700 metros el registro de resistividad no se corrió debido a problemas de comunicación con la sonda, sólo se adquirieron puntos de datos insuficientes cada cinco metros aproximadamente, por lo cual se decidió suprimir esta información debido a su escasa confiabilidad (Figura 4).

Registro de resistividad profunda (Rt)

En petrofísica hay dos tipos de resistividad: Rt (resistividad profunda) y Rxo (resistividad somera) que tienen que ver con el nivel de medición de la herramienta de registro, es decir, de la profundidad de investigación hacia la formación; Rxo también se le conoce como

normal corta o resistividad de zona lavada, Rt recibe los de normal larga o resistividad verdadera. En este registro se identificaron seis unidades litológicas, tres más que en su homólogo somero, y a diferencia de éste, la herramienta que realizó su medición no tuvo problemas para obtener información en la parte superior del pozo a partir de los 21 metros de profundidad, excepto en la zona de 466.07 a 522.56 metros, donde no se registró ningún dato (al igual que con el registro de Rxo, la herramienta presentó problemas de comunicación que impidieron una adecuada recuperación de datos). En las dos primeras unidades, Rt_{U1} y Rt_{U2}, las resistividades promedio son de 0.72 y 1.83 Ω-m respectivamente, valores bajos que corresponden a rocas sedimentarias carbonatadas constituidas principalmente por margas, calizas y lutitas. Las resistividades máximas en estos intervalos confirman la presencia de lutitas, habiendo una mayor cantidad de éstas en la segunda unidad, cualidad que determina la diferencia en la resistividad media entre ambas unidades, que conformarían un solo paquete de rocas sedimentarias posteriores al impacto. La tercera unidad (Rt_{U3}) se caracteriza por un cambio importante en las propiedades del registro, el cual está marcado por una fuerte disminución de la resistividad y que indica una zona de transición litológica de las rocas sedimentarias post-impacto al anillo de picos del cráter, el cual estaría constituido principalmente por suevita y brechas fundidas de impacto (Morgan *et al.*, 2002, 2007, 2016; Gulick *et al.*, 2013). En la parte inferior del pozo, el registro de resistividad profunda presentó un comportamiento casi idéntico al de resistividad somera. La cuarta unidad (Rt_{U4}) posee las resistividades más altas con un promedio de 3.98 Ω-m; la quinta unidad (Rt_{U5}) tiene la media más baja de estos tres intervalos inferiores con 2.01 Ω-m, y no exhibe ningún cambio litológico, descartando así la presencia de diques en esta zona; y finalmente la sexta unidad (Rt_{U6}) presenta

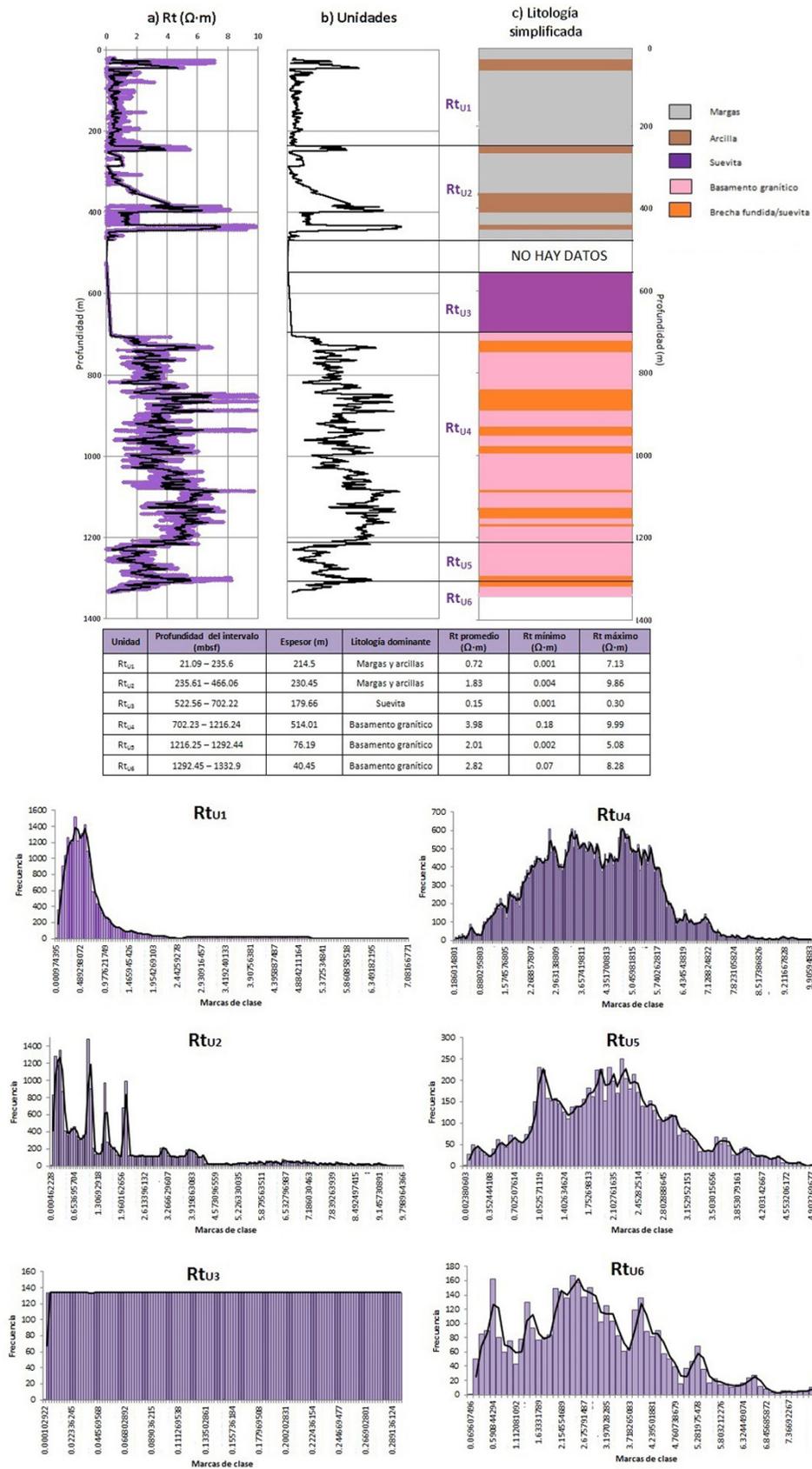


Figura 5. Interpretación petrofísica del registro de resistividad profunda (Rt): (a) registro con media móvil, (b) límites de las unidades litológicas y (c), litología simplificada.

una media de 2.82 Ω -m, parecida a la cuarta unidad, ambas muestran picos en sus resistividades, confirmando así la existencia de diques en dichos intervalos. Si la tercera unidad supone la parte superior del anillo de picos, las unidades cuatro, cinco y seis constituirían el anillo de picos inferior (Figura 5).

Registro de velocidad de onda P (Vp)

En el registro de velocidad de onda P se detectaron tres unidades litológicas a partir de 508.48 y hasta 1333.68 metros. En la primera unidad (Vp_{U1}) se observa que la velocidad de onda P va de 1445.97 a 4926.18 m/s, mostrando un claro aumento de la velocidad respecto a la profundidad, lo que indica que la densidad de las rocas se incrementa mientras su porosidad disminuye. Del registro de resistividad profunda determinamos que esta zona pertenece a un intervalo de rocas sedimentarias, las cuales estarían compuestas principalmente de margas, calizas y lutitas; y como el registro exhibe un aumento en la velocidad de onda, podemos inferir que en esta unidad existe una transición de margas y lutitas a calizas, o que éstas últimas predominan en lo que sería la base de los sedimentos post-impacto que recubrieron el cráter. El segundo intervalo (Vp_{U2}) es una zona de baja velocidad, aquí las velocidades de la onda P son más bajas en comparación con las rocas sedimentarias de la primera unidad, mostrando una fuerte disminución en su densidad, lo que significa un cambio litológico abrupto e indica una transición de facies, más allá de algún rasgo estructural. Estudios geofísicos indican que el anillo de picos del Chicxulub está compuesto de rocas que tienen bajas velocidades y densidades debido a que están muy fracturadas y son altamente porosas (Morgan *et al.*, 2000, 2011; Gulick *et al.*, 2013), así que la litología de esta unidad estaría formada por suevita y brecha fundida de impacto (Stöffler y Grieve,

2007), ésta última se sitúa en la base del intervalo dado que existe un ligera y abrupta disminución de la velocidad. Esta unidad marca la transición de la roca sedimentaria al anillo de picos del cráter a partir de 619.73 metros, que es donde se abaten las velocidades. Este intervalo puede correlacionarse con la tercera unidad del registro de resistividad profunda (Rt_{U3}), donde se definió el cambio litológico de los sedimentos post-impacto a las rocas impactadas. En la tercera unidad (Vp_{U3}) las velocidades de las ondas P aumentan con la profundidad con excursiones locales asociadas a diques de impactitas (*suevitas*, *brechas* y *brechas fundidas*), ya que éstas tienen una densidad menor respecto a los granitoides (Urrutia Fucugauchi, 2006). En general, las densidades no varían mucho, a excepción de los cambios provocados por los diques. Los valores de velocidad permanecen constantes a través del basamento granítico (Figura 6).

Registro de conductividad eléctrica (σ)

El registro de conductividad eléctrica se utilizó para determinar la calidad del fluido del pozo durante la construcción del M0077A. Así que, si bien, se distinguieron cuatro unidades, éstas representan principalmente el comportamiento del fluido dentro del pozo. Sin embargo, éste registro sí midió la conductividad de las rocas más allá de la zona de invasión del agujero, puesto que los valores promedio corresponden a las litologías detectadas en los perfiles de resistividad y velocidad de onda P. Por ejemplo, a partir de 701.34 y hasta 1220 metros, las conductividades medias registradas fueron de ~200 dS-m, cantidades asociadas con rocas graníticas, cuyo rango varía de 200 a 650 dS-m; valores coincidentes con las mediciones promedio de las unidades tres (σ_3) y cuatro (σ_4), principalmente con ésta última. Además, se observa una anti-correlación (discordancia) entre este registro y

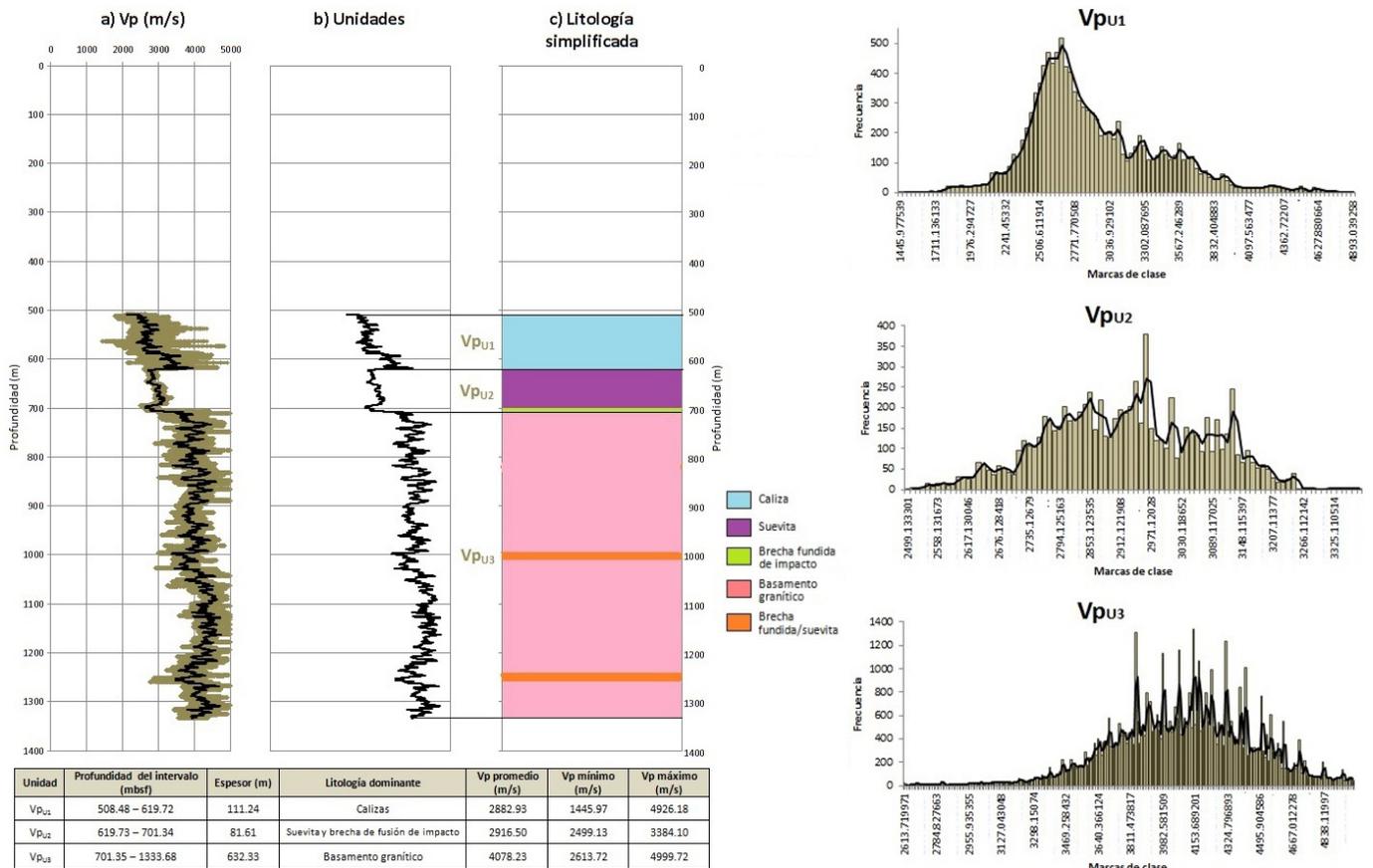


Figura 6. Interpretación petrofísica del registro de velocidad de Onda P (Vp).

el de velocidad de onda P (V_p) a partir de los 508.48 metros y hasta la profundidad total del pozo (Figura 7). Si bien el objetivo principal del registro de conductividad eléctrica era determinar y evaluar la calidad de los fluidos del pozo, de este perfil también se pudo obtener información útil para la caracterización litológica del M0077A. Y aunque no se emplea directamente para este propósito, si se utilizó de forma indirecta para asistir y verificar las mediciones del registro de velocidad de onda P.

Registro de susceptibilidad magnética (χ)

El registro de susceptibilidad magnética proporcionó seis unidades: la primera (χ_{U1}) se caracteriza por una baja susceptibilidad constante relativa a las rocas sedimentarias post-impacto; en la parte final de este intervalo, en las profundidades de 617.45 a 706.63 metros, se aprecia

un incremento repentino de la susceptibilidad que señala la transición de los sedimentos que recubrieron el cráter a las litologías que integran el anillo de picos del Chicxulub, está zona estaría compuesta principalmente por suevita, la cual posee una susceptibilidad mayor a la de las rocas carbonatadas, pero menor a las brechas fundidas de impacto, ya que la susceptibilidad magnética de las rocas es directamente proporcional a la concentración de minerales magnéticos y el contenido de hierro (Fe) en ellas (Urrutia Fucugauchi et al., 1996; Rebolledo-Vieyra y Urrutia Fucugauchi, 2004); éstas brechas constituyen la litología dominante de la segunda unidad (χ_{U2}), intervalo que presenta la susceptibilidad media más alta de todas las unidades y que sería consistente con la segunda unidad del registro de velocidad de onda P (V_{pU2}) y la tercera del de resistividad profunda (R_{tU3}). Las unidades tres (χ_{U3}), cuatro (χ_{U4}), cinco (χ_{U5}) y seis (χ_{U6}) muestran una susceptibilidad magnética consistente

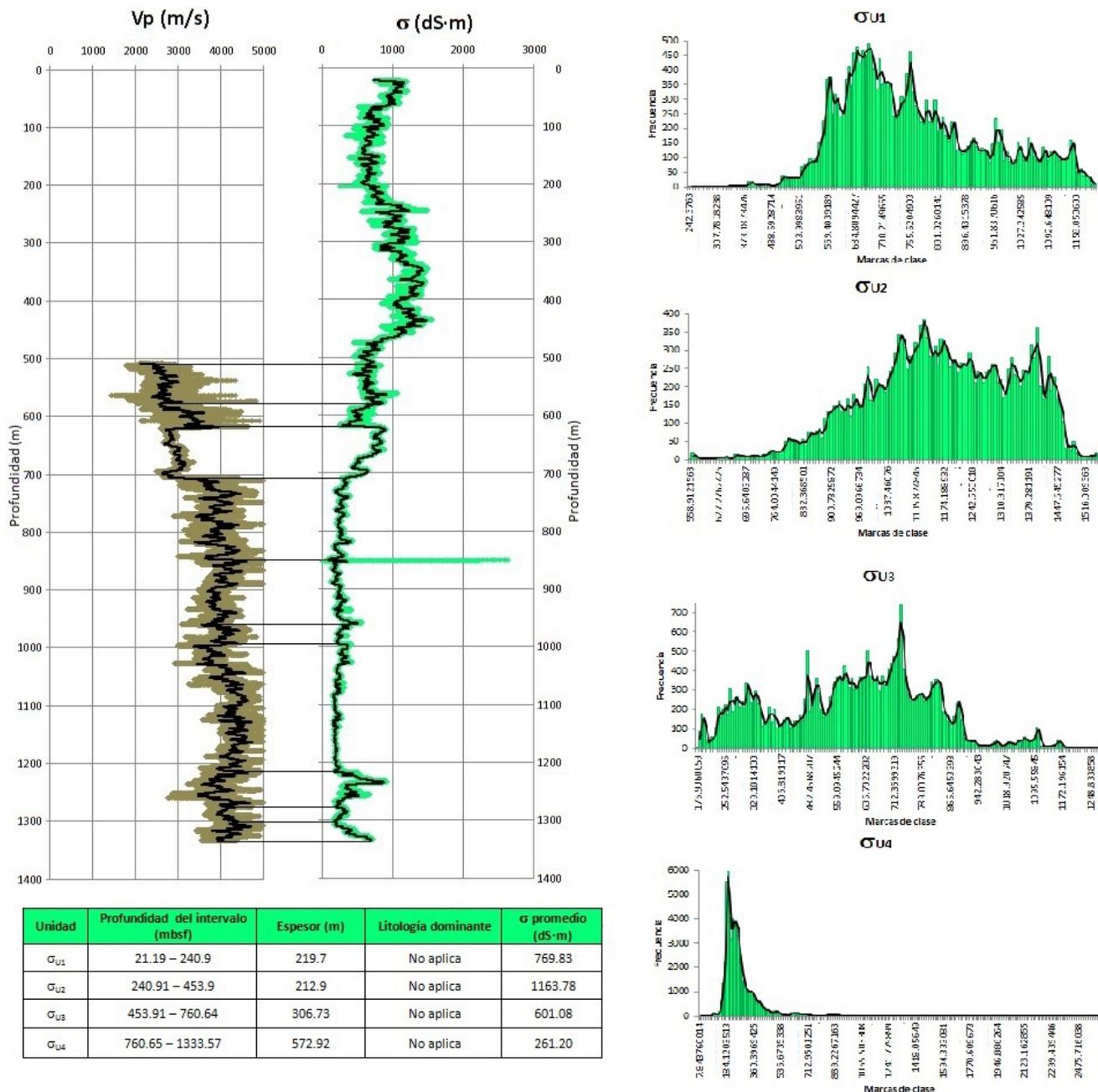


Figura 7. Perfil de anti-correlación de los registros de conductividad eléctrica (σ) y velocidad de Onda P (V_p).

al basamento granítico con evidentes incursiones positivas y negativas de diques de impactitas, estas incursiones son positivas si los diques consisten o tienen una composición predominante de brecha fundida de impacto, son negativas si su estructura es mayormente de suevita. Este comportamiento de las mediciones en la parte inferior del pozo es similar en los registros de resistividad y de velocidad de onda P. Las unidades tres y cinco poseen susceptibilidades muy semejantes entre sí con promedios de 3.44 y 2.77 mSI respectivamente, la diferencia es determinada por la presencia de los diques de impactitas y del tipo de roca dominante que los conforman. Las susceptibilidades máximas y mínimas indican una mayor presencia de diques en los intervalos cuatro y seis (Figura 8). El registro de susceptibilidad magnética es fundamental en el estudio del cráter Chicxulub debido a las propiedades magnéticas que poseen las rocas originadas y afectadas por el impacto.

Registro de rayos gamma (RG)

El registro de rayos gamma mide la radiación natural emitida por una formación, producto de la desintegración natural de pequeñas cantidades de elementos radiactivos presentes en las rocas, es útil para indicar arcillosidad (*indicador alusivo al contenido, volumen y tipo de arcillas en una litología; si los niveles de arcilla son nulos o muy bajos, se dice que es una formación limpia*), presencia de lutitas, definir espesores de los estratos, cambios litológicos y para correlación. En este registro se identificaron tres unidades litológicas, la primera (RG_{U1}) se localiza en el intervalo de 0 a 269.5 metros, aquí la radiactividad natural tiene un rango de 0 a 263.98 °API, con una media de 89.81 °API; en esta unidad las radiaciones naturales indican un alto contenido de arcilla, por lo que arcillas y lutitas serían las litologías dominantes en la parte superior del pozo. La segunda unidad (RG_{U2}) se encuentra de 269.51 y hasta 720.11 m, en este intervalo la radiactividad natural disminuye considerablemente respecto a la primera unidad, con un rango de 1.82 a 161.72 °API, y un promedio de 48.12 °API; en esta profundidad los sedimentos post-impacto están conformados principalmente por ca-

lizas hasta la profundidad de 617.33 metros, a partir de aquí los rayos gamma se incrementan de forma abrupta. Este cambio repentino en la radiación significa una variación litológica del pozo, determinando la zona de transición de la roca sedimentaria posterior al impacto a la suevita del anillo de picos del cráter. Esta zona está marcada por el aumento de las señales de rayos gamma y de susceptibilidad magnética. La tercera unidad (RG_{U3}) comprende las profundidades de 720.12 a 1331.67 m, en este intervalo la radiactividad vuelve a incrementarse proporcionando valores consistentes con el basamento granítico con una media de 216.5 °API. En este registro también se detectaron incursiones de diques de suevita (Figura 9). Los rayos gamma naturales y la susceptibilidad magnética son constantes en general en el basamento granítico y ambos muestran claras incursiones de diques de suevitas y brechas fundidas. Los valores del registro de rayos gamma son confiables, y junto con el registro de susceptibilidad magnética, estos perfiles no tuvieron problemas en sus herramientas para la recuperación de datos, a diferencia de los registros de resistividad y velocidad de onda P. Sin embargo, el grupo de científicos de la Expedición 364 sugiere que la información obtenida del registro de rayos gamma se utilice de forma cualitativa, debido a la atenuación de la señal entrante en las herramientas que realizaron la medición (Morgan *et al.*, 2016; Lofi *et al.*, 2018); dos factores debilitaron la señal entrante del registro: (1) los rayos gamma fueron tomados a través de la tubería de revestimiento, es decir, se corrió el registro en agujero entubado; si bien, esta medición puede obtenerse tanto en agujero descubierto como entubado, se considera que debido a la tubería existe una ligera atenuación de la señal entrante; y (2), debido a las condiciones mecánicas del pozo, en algunos intervalos se aumentó la velocidad de la sonda para poder realizar todas las mediciones previstas, lo que incrementó el ruido en la señal de la herramienta. Los componentes espectrales de los rayos gamma (U, Th, K) son poco veraces, ya que los recuentos totales en la formación fueron bajos, registrando con frecuencia valores negativos, los cuales son indicadores de estadísticas incorrectas (Gulick *et al.*, 2017a).

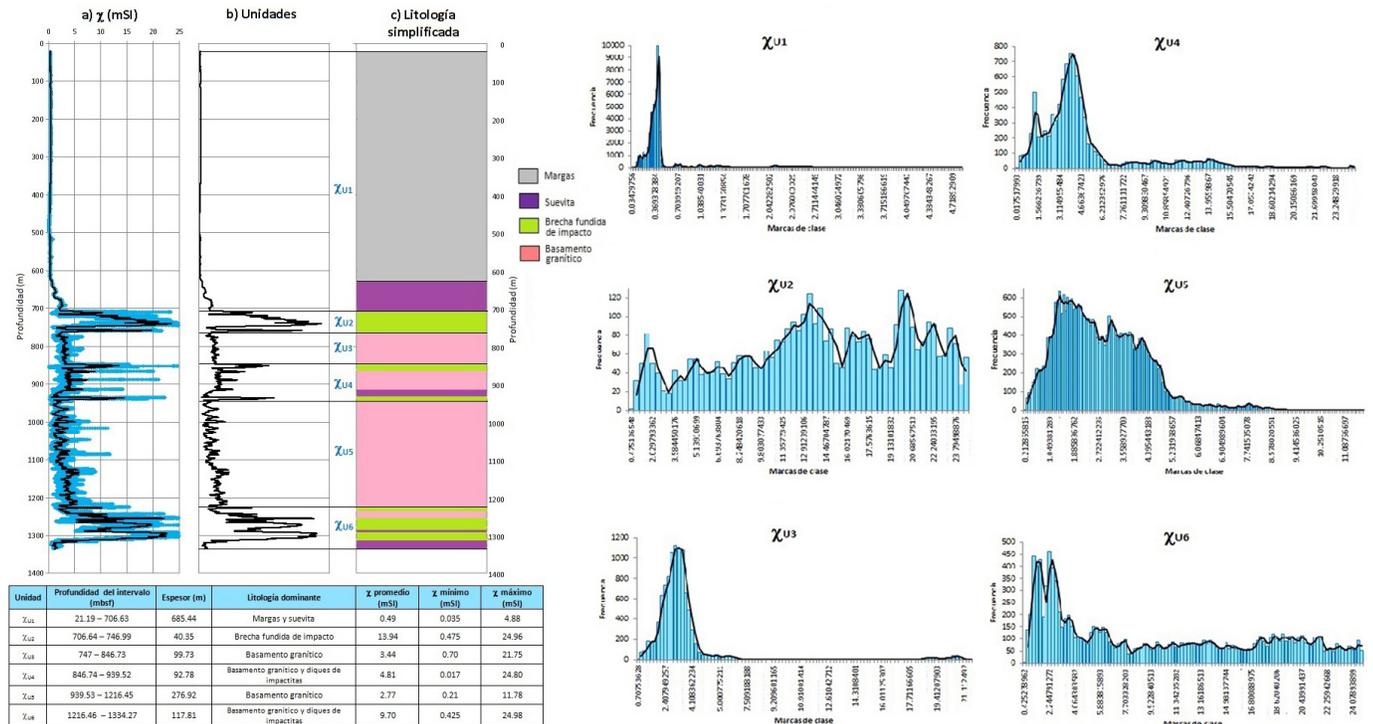


Figura 8. Interpretación petrofísica del registro de susceptibilidad magnética (χ).

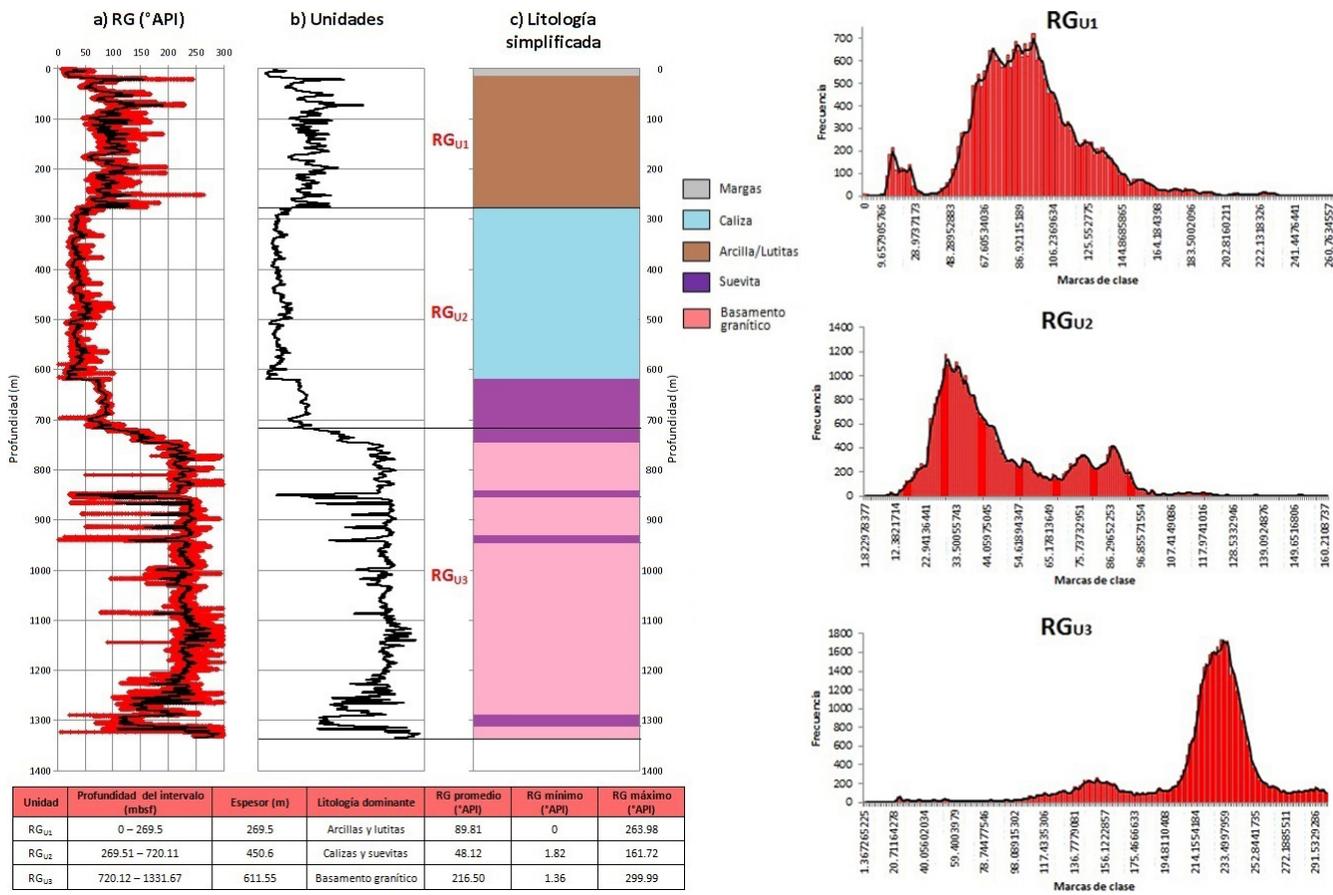


Figura 9. Interpretación petrofísica del registro de rayos gamma (RG).

INTEGRACIÓN DE LOS DATOS DEL POZO

Posterior a la descripción de los registros geofísicos del pozo, la determinación de probables unidades litológicas y su análisis estadístico, es posible identificar perfiles de correlación entre los diferentes registros para realizar una interpretación más certera, y definir qué propiedades petrofísicas se pueden interpretar y cuáles no, es decir, clasificar qué registros son necesarios y cuales son prescindibles (Tabla 1). Es necesario mencionar que antes de iniciar con la metodología de análisis e interpretación, los registros del M0077A se encontraban a la misma profundidad, esto es necesario ya que la medición de la profundidad total con herramientas de cable es inexacta debido a: variaciones en el intervalo de las corridas de los registros, peso y forma de la sonda (*si es cilíndrica o está montada en un caliper*) y al estado mecánico del pozo. Por ello, el cambio y la coincidencia de profundidad de los registros geofísicos del pozo es una tarea fundamental que consiste en evaluar la profundidad de ejecución de cada registro y referenciarlos a marcadores exactos para todos los perfiles, como los datos de plataforma y del fondo del mar, pues una falla al correlacionar los registros cuando existe un desfase de profundidades invalidaría por completo la interpretación de los mismos.

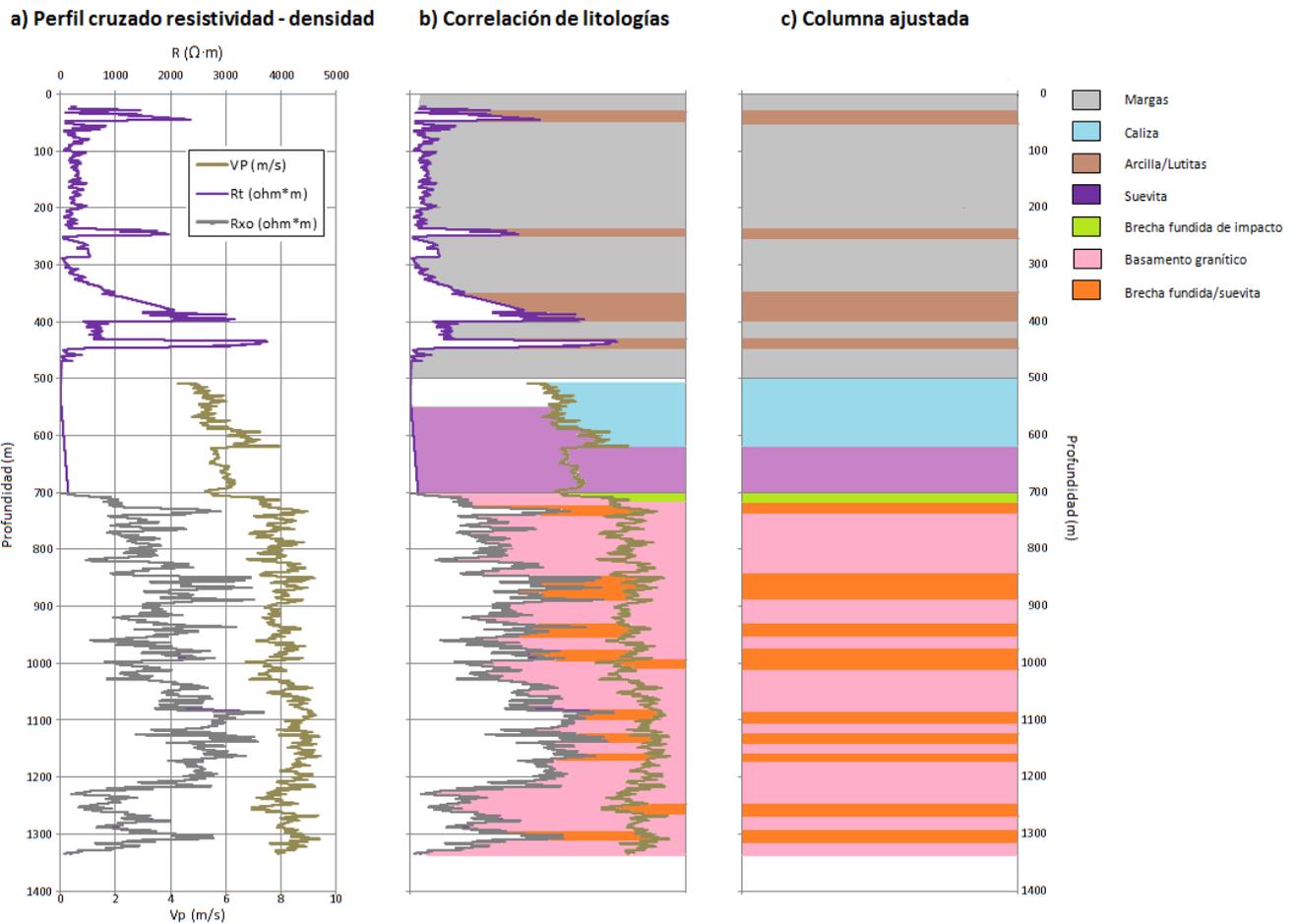
Integración de los registros de resistividad (Rxo, Rt) y velocidad de onda P (Vp)

De 0 a 466 metros se cuenta únicamente con los datos de resistividad profunda, pues como se mencionó anteriormente, las herramientas de los registros de Rxo y Vp no recuperaron datos

confiables en esta zona del pozo. En esta profundidad los valores de resistividad corresponden a rocas sedimentarias carbonatadas, que estarían constituidas principalmente por margas, calizas y lutitas, las resistividades máximas en este intervalo confirman la presencia de lutitas. Después hay una sección de 42 metros (de 406.06 a 508.48 m) donde ninguno de estos tres registros obtuvo información, pero que sí está registrado en los perfiles de rayos gamma naturales y susceptibilidad magnética, así que su litología se determina con éstos últimos. A partir de 508.48 y hasta los 619.72 metros, el registro de onda P muestra un aumento de la velocidad respecto a la profundidad, indicando que la densidad de las rocas sedimentarias se incrementa mientras su porosidad disminuye; podemos inferir que en esta unidad predominan las calizas. Luego, de 619.73 a 702.22 metros está la zona de baja velocidad sísmica que en el registro de resistividad aparece como un intervalo de transición, que representa el cambio litológico de los sedimentos post-impacto a las impactitas que conforman el anillo de picos del cráter, que son rocas altamente fracturadas y porosas (Christeson *et al.*, 2018; Morgan *et al.*, 2016; Gulick *et al.*, 2013). Bajo estas rocas, de 702.23 y hasta 1332.9 los perfiles de los tres registros determinan que la litoestratigrafía dominante se trata del basamento granítico que subyace a la Plataforma de Yucatán, con algunos picos máximos de resistividad y mínimos en la velocidad que señalan cambios litológicos abruptos debido a la presencia de diques de rocas con una densidad menor a la de los granitoides, que podrían ser diques de suevita y brechas fundidas (Stöffler y Grieve, 2007). La resistividad y la velocidad de onda P están bien correlacionadas en la escala del pozo, muestran perfiles concordantes entre sí, lo que revalida y ajusta el comportamiento litológico individual de cada registro. Figura 10.

Tabla 1. Síntesis de la clasificación de los registros para la integración de los datos del pozo M0077A.

| Registros utilizados para la caracterización del Chicx-03A | Descripción |
|---|---|
| Resistividad somera (Rxo) | Mediciones confiables que determinan litologías |
| Resistividad profunda (Rt) | Mediciones confiables que determinan litologías |
| Velocidad de onda P (Vp) | Mediciones confiables que determinan litologías |
| Conductividad eléctrica (σ) | Mediciones confiables que determinan litologías |
| Susceptibilidad magnética (χ) | Mediciones confiables que determinan litologías |
| Rayos gamma (RG) | Mediciones confiables que determinan litologías |
| Registros no utilizados para la caracterización del Chicx-03A | Descripción |
| Contenido de uranio (U) | Estadísticas incorrectas, valores negativos, poca confiabilidad |
| Contenido de potasio (K) | Estadísticas incorrectas, valores negativos, poca confiabilidad |
| Contenido de torio (Th) | Estadísticas incorrectas, valores nulos |



| UNIDADES | | | PROFUNDIDAD (mbsf) | LITOLOGIA DOMINANTE | LITOLOGÍA SEGUNDARIA |
|-------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|
| Rxo | Rt | Vp | | | |
| | Rt _{U1} | | 21.09 – 235.6 | Margas | Arcillas |
| | Rt _{U2} | | 235.61 – 466.06 | Margas | Arcillas |
| | Rt _{U3} | Vp _{U1} | 508.48 – 619.72 | Calizas | – |
| | | Vp _{U2} | 522.56 – 702.22 | Suevita | Brecha de fusión de impacto |
| RxO _{U1} | Rt _{U4} | Vp _{U3} | 702.23 – 1216.24 | Basamento granítico | Brecha fundida/suevita |
| RxO _{U2} | Rt _{U5} | | 1216.25 – 1292.44 | Basamento granítico | Brecha fundida/suevita |
| RxO _{U3} | Rt _{U6} | | 1292.45 – 1332.9 | Basamento granítico | Brecha fundida/suevita |

Figura 10. Integración de los registros de resistividad (Rxo, Rt) y velocidad de onda P (Vp): (a) perfil cruzado (*crossplot*); (b) correlación de litologías y (c), columna ajustada.

Integración de los registros de rayos gamma (RG) y susceptibilidad magnética (χ)

Esta integración muestra dos registros que poseen un contraste marcado entre sí en la determinación de algunas litologías: rocas que presentan una baja susceptibilidad magnética, tienen altos valores de radiactividad natural, y viceversa, rocas con baja radiactividad exhiben una alta susceptibilidad. Cabe destacar que este comportamiento contrastante no se da o no es tan marcado en todos los tipos de rocas, pero es fundamental en la caracterización petrofísica de litologías de impacto, donde la susceptibilidad magnética es una herramienta importante en su descubrimiento y localización (Urrutia Fucugauchi et al., 2004). La discordancia de estos perfiles permite correlacionar litologías de igual manera que se hace en la concordancia de registros como los de resistividad y densidad. De 0 a 617.3 metros los valores de susceptibilidad magnética son bajos, consistentes con litologías carbonatadas, entretanto los rayos gamma presentan un promedio de 90° API, con una variación general baja, salvo en la parte superior del pozo (21.2 a 269.5 m), donde se registraron valores máximos de radiación, indicativos de la presencia de arcillas y lutitas, por lo que este intervalo correspondería a una formación predominantemente arcillosa. A partir de 617.33 y hasta los 712.84 metros, las mediciones de ambos registros comienzan a aumentar respecto a la profundidad, por lo que se marca en este intervalo la transición de los sedimentos post-impacto al anillo de picos. De 712.84 a 747.02 metros se observa un cambio muy evidente en el comportamiento de los perfiles, especialmente el de susceptibilidad magnética, que presenta sus valores máximos en este pequeño intervalo; la variabilidad es alta respecto a la parte superior de las impactitas, lo cual puede deberse a una anisotropía mucho mayor, señalando la presencia de diferentes litologías de impacto. El contacto entre las impactitas de la parte superior del anillo de picos y el basamento granítico se encuentra en 747.2 metros, y se caracteriza por una fuerte disminución en la susceptibilidad magnética y un aumento de los rayos gamma. Este intervalo inferior del pozo presenta una variación moderada en la radiactividad (con un promedio de 216.5 °API, valor consistente con los granitoides) y baja en la susceptibilidad (con una media de ~5 mSI), registrando valores crecientes (en la susceptibilidad) y decrecientes (en la radiactividad) en intervalos que presentan mediciones consistentes con la suevita y las brechas fundidas; con estos registros se revalidarían las interpretaciones que deducen que los diques de la parte baja del anillo de picos están compuestos por litologías de impacto. Figura 11.

Integración final

La integración de los registros del pozo determinó que la columna litoestratigráfica del M0077A puede dividirse en tres unidades litoló-

gicas principales: (1) rocas sedimentarias post-impacto; (2) litologías de impacto y (3), el basamento granítico (Tabla 2).

La primera unidad (0 – 616.58 mbsf, *meters below sea floor*), está conformada por las rocas sedimentarias que recubrieron el cráter, que son las que hicieron posible su preservación (Urrutia Fucugauchi et al., 1996). Estos sedimentos están compuestos principalmente por margas, calizas, arcillas y lutitas. La segunda unidad (617.33 – 747.02 mbsf), está formada por impactitas: suevitas y brechas fundidas. Estas rocas se caracterizan por cambios importantes en las propiedades de los registros, tales como baja densidad y alta susceptibilidad magnética. Esta segunda unidad litológica pertenece al anillo de picos del cráter, específicamente a su parte superior. La tercera unidad (747.2–1334.27 mbsf), está constituida por el basamento granítico con numerosas intrusiones de diques. Las lecturas de los registros de susceptibilidad magnética, rayos gamma y velocidad de onda P indican que se trataría primordialmente de diques de brechas de impacto. Esta unidad pertenece también al anillo de picos del cráter, es su parte inferior. En la columna *d*, se compendian las litologías detectadas por los registros geofísicos del pozo. Se realizó una generalización litológica a cuatro tipos de rocas: los sedimentos post-impacto incluyen margas, arcillas, lutitas y calizas; las impactitas refieren a la suevita y las brechas fundidas de impacto; el basamento granítico abarca a los granitoides; y la cuarta, la de los diques de brechas, hace referencia a un rasgo litológico y estructural, razón por la cual no se resumieron dentro de su litoestratigrafía dominante. Figura 12.

MODELO PETROFÍSICO

El modelo petrofísico compendia las litologías caracterizadas, cumpliendo su objetivo de generar una representación de la columna litoestratigráfica del pozo M0077A. Figura 13.

La columna *a*, presenta la división general del pozo en tres unidades litoestratigráficas con sus respectivas profundidades: (1) sedimentos posteriores al impacto (0–616.58 mbsf); (2) impactitas (617.33–747.02 mbsf); y (3), basamento granítico (747.2–1334.27 mbsf). En la columna *b*, se muestra de forma simplificada la caracterización litológica resultante de la integración de los registros geofísicos del pozo. La columna *c*, presenta la misma litología pero con una simbología detallada para visualizar algunas de las características físicas de las unidades litoestratigráficas: en la primera unidad, se representó con un solo trazo la secuencia de los sedimentos post-impacto; en la segunda unidad, la de las impactitas, se utilizaron dos diseños para simbolizar las litologías detectadas en este intervalo, las suevitas y las brechas fundidas de impacto, éstas últimas se sitúan en la parte inferior de esta unidad, aproximadamente de 706.63 hasta

Tabla 2. Unidades litológicas del pozo M0077A.

| No. | Unidad | Profundidad (mbsf) | Litologías | Unidad de registro | | | |
|-----|---------------------|--------------------|---|--------------------|------------------|-------------|------------------|
| | | | | Rt _{U1} | Vp _{U1} | χ_{U1} | RG _{U1} |
| 1 | Rocas Sedimentarias | 0 – 616.58 | Margas, calizas, lutitas, arcillas | Rt _{U2} | | | |
| 2 | Impactitas | 617.33 – 747.02 | Suevita, brechas fundidas de impacto | Rt _{U3} | | | |
| 3 | Basamento granítico | 747.2 – 1334.27 | Granitoides, suevita, brechas fundidas de impacto | Rxo _{U1} | Vp _{U3} | χ_{U3} | RG _{U3} |
| | | | | Rt _{U4} | | | |
| | | | | Rxo _{U2} | | | |
| | | | | Rt _{U5} | | | |
| | | | | Rxo _{U3} | | χ_{U4} | |
| | | | | Rt _{U6} | | χ_{U5} | |
| | | | | | | χ_{U6} | |

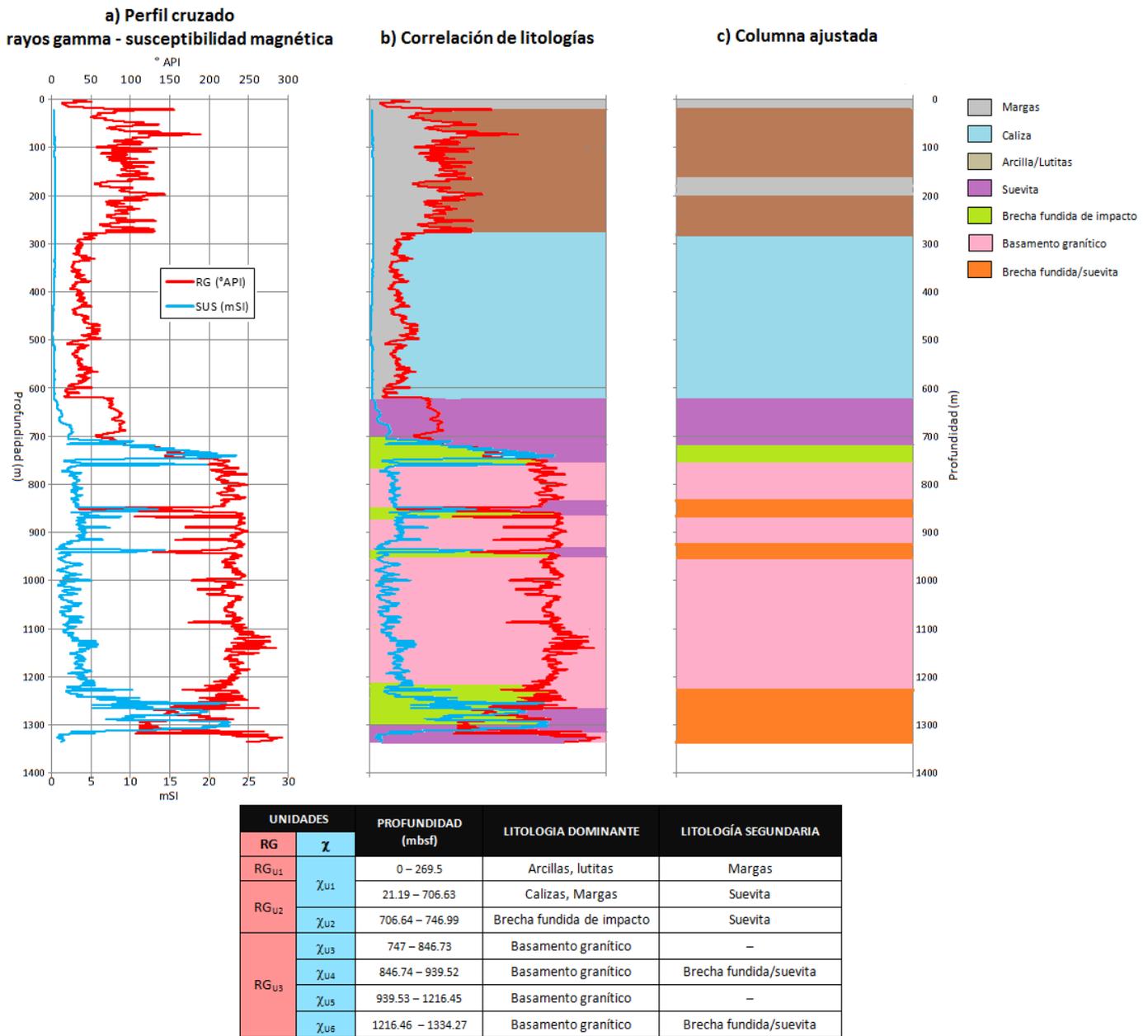


Figura 11. Integración de los registros de rayos gamma (RG) y susceptibilidad magnética (χ).

747.02 mbsf; en la tercera unidad, es donde resultaron más útiles los detalles dibujados, pues permitieron esbozar la presencia de los diques en el basamento granítico. En la columna *d*, se presentan imágenes de núcleos representativos de cada unidad litológica: en los sedimentos post-impactos se mostraron dos núcleos, 1A corresponde a margas recuperadas a ~15 mbsf y 1B pertenece a calizas de ~615 mbsf; en las impactitas se muestran también dos núcleos, 2A es la foto de una suevita extraída a ~688 mbsf y 2B la de una brecha fundida de impacto obtenida a ~734 mbsf; en el basamento granítico se colocó la imagen de un espécimen de granitoide fracturado recuperado a ~853 mbsf. Finalmente, en la columna *e*, se interpretan las unidades litológicas en términos de sus características estructurales. La primera unidad, pertenece a los sedimentos post-impacto que son parte de la plataforma carbonatada de Yucatán; estos sedimentos son una mezcla de litologías dominadas por calizas, margas, arcillas y lutitas

principalmente (Morgan *et al.*, 2005; Vermeesch y Morgan, 2008; Urrutia Fucugauchi *et al.*, 2011; Morgan *et al.*, 2017). La evaluación de las secuencias carbonatadas presenta desafíos para la caracterización y la interpretación petrofísica (Al-Marzouqui *et al.*, 2010; Barros-Galvis *et al.*, 2015). La interpretación conjunta de registros de pozo permite acotar la interpretación. De acuerdo a las simulaciones numéricas de la formación del anillo de picos, éste está constituido por litologías de impacto y por rocas del basamento altamente fracturadas, las primeras conformarían la parte superior de la estructura y las segundas la parte inferior, zonas clasificadas como anillo superior y anillo inferior respectivamente (Collins *et al.*, 2002, 2008; Gulick *et al.*, 2008; Kring *et al.*, 2004; Morgan *et al.*, 2002, 2007, 2016; Urrutia Fucugauchi *et al.*, 2004, 2008). De acuerdo a estas predicciones, la segunda unidad que contiene las impactitas corresponde al intervalo superior del anillo, y la tercera unidad del basamento granítico al intervalo inferior; ambas

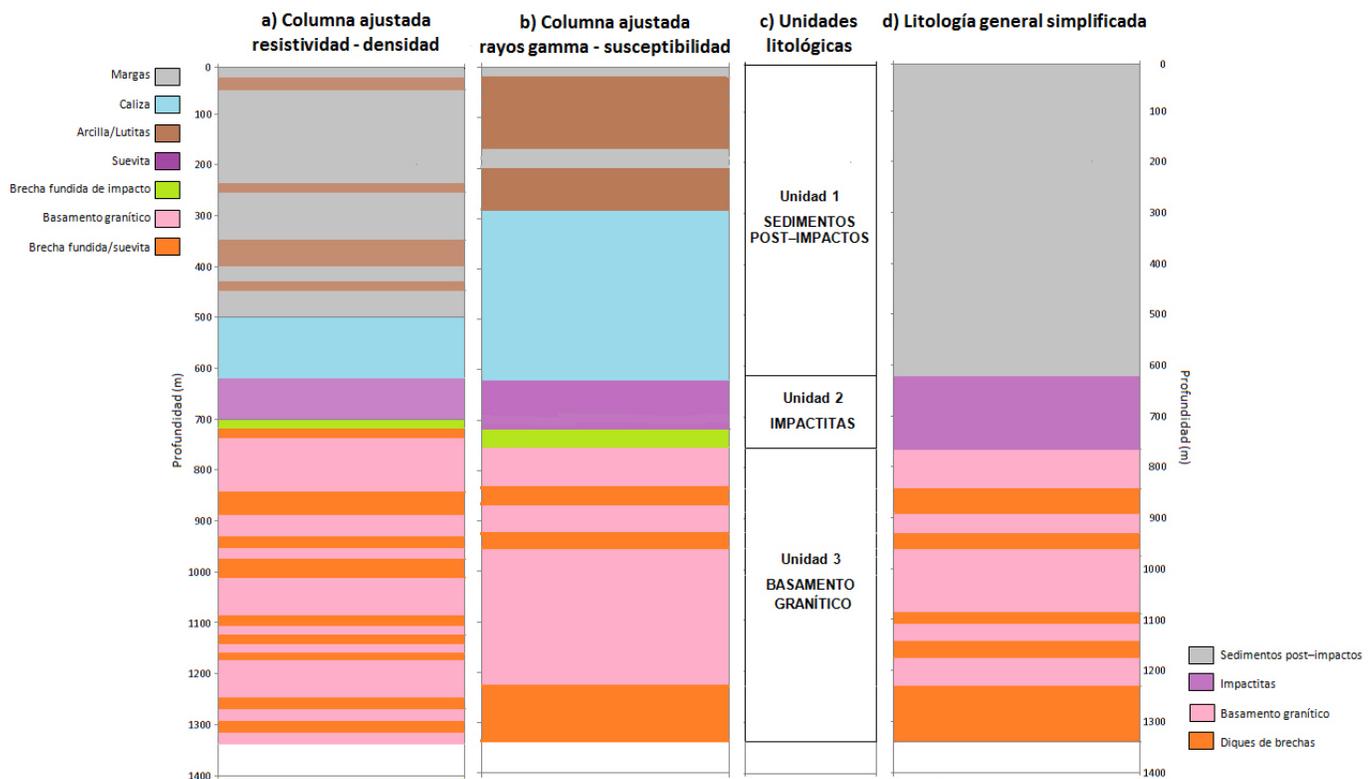


Figura 12. Integración final del conjunto de los registros seleccionados: (a) columna ajustada de los registros de resistividad y velocidad de onda P; (b) columna ajustada de los registros de rayos gamma y susceptibilidad magnética; (c), unidades litológicas; y (d), litología general simplificada del pozo M0077A.

unidades integran el anillo de picos del cráter Chicxulub. Este modelo muestra un esbozo de la columna atravesada por el pozo M0077A, y arroja resultados compatibles con las hipótesis de la naturaleza y formación del anillo de picos, en las que se conjetura que éste se constituye por rocas del basamento brechadas, elevadas (levantadas) y fracturadas; y por material fundido y fragmentado perteneciente a otras litologías (Collins *et al.*, 2002, 2008; Gulick *et al.*, 2008; Kring *et al.*, 2004; Morgan *et al.*, 2002, 2007, 2016; Urrutia Fucugauchi *et al.*, 2004, 2008).

CONCLUSIONES

La interpretación de los resultados define tres unidades litoestratigráficas en el pozo M0077A: (a) sedimentos post impacto (0–616.58 m), (b) impactitas (617.33–747.02 m) y (c) basamento granítico (747.2–1334.27 m). de estas tres unidades, dos pertenecen al anillo de picos. Cabe resaltar que no se delimitaron subunidades dentro de los intervalos por no ser uno de los objetivos de este trabajo, eso correspondería a trabajos que incluyan la utilización de los núcleos recuperados del pozo.

Los perfiles de resistividad, somera (Rxo) y profunda (Rt), presentan un comportamiento casi idéntico a partir de 702.23 y hasta 1332.9 metros, lo cual podría significar que uno de los dos registros está repetido, o que una de las mediciones no se llevó a cabo y la otra se replicó para suplirla. El registro Rxo mide la resistividad de la zona lavada (*flushed zone*), con limitada penetración, midiendo las resistividades de materiales muy cercanos al pozo. Los valores de resistividad no son siempre representativos de la formación al estar invadidos por los fluidos de perforación. Los valores promedio de resistividad en ambos registros en las profundidades indicadas son de

~2.18 Ω -m, es posible que estas cantidades correspondan a la influencia de la zona invadida, por lo que se sugirió que ambos registros de resistividad podrían tratarse de perfiles Rxo, situación que restaría confiabilidad a estas mediciones para caracterizar litológicamente las rocas fuera de la zona invadida. Sin embargo, en los reportes de la expedición se especifica que los dos registros de resistividad se realizaron con herramientas independientes, la herramienta somera fue una DLL3 y la profunda una DIL.

En las tres unidades litológicas identificadas, los registros geofísicos de pozo mostraron valores mínimos y máximos que nos permitieron describir las tendencias y asociaciones litológicas: (a) los registros de resistividad muestran incrementos abruptos en la tercera unidad del pozo, lo que indica la presencia de diques de brechas de impacto y suevita dentro del basamento granítico, mismos que serían confirmados por los valores máximos medidos por el registro de susceptibilidad magnética y se correlacionan directamente con los índices mínimos del perfil de rayos gamma naturales; el registro de velocidad de onda P indica la presencia de impactitas a través de sus velocidades mínimas. El basamento granítico fue identificado por valores mínimos de susceptibilidad magnética en contraste con altos índices de radiactividad. En la primera unidad, la de los sedimentos post-impacto, los máximos medidos en los registros resistivos y el de rayos gamma, indican la presencia de arcillas intercaladas a dentro de los sedimentos carbonatados.

El método de análisis presenta ventajas y limitaciones. Algunas de las aportaciones son las siguientes: (a) la aplicación de un método analítico que engloba múltiples registros geofísicos de pozo; (b) identificación y delimitación de posibles unidades litológicas a partir del examen de los perfiles y posterior verificación a través de un examen estadístico de los registros; (c) desarrollo de correlaciones entre cinco tipos de registros que miden propiedades físicas diferentes; y (d), cons-

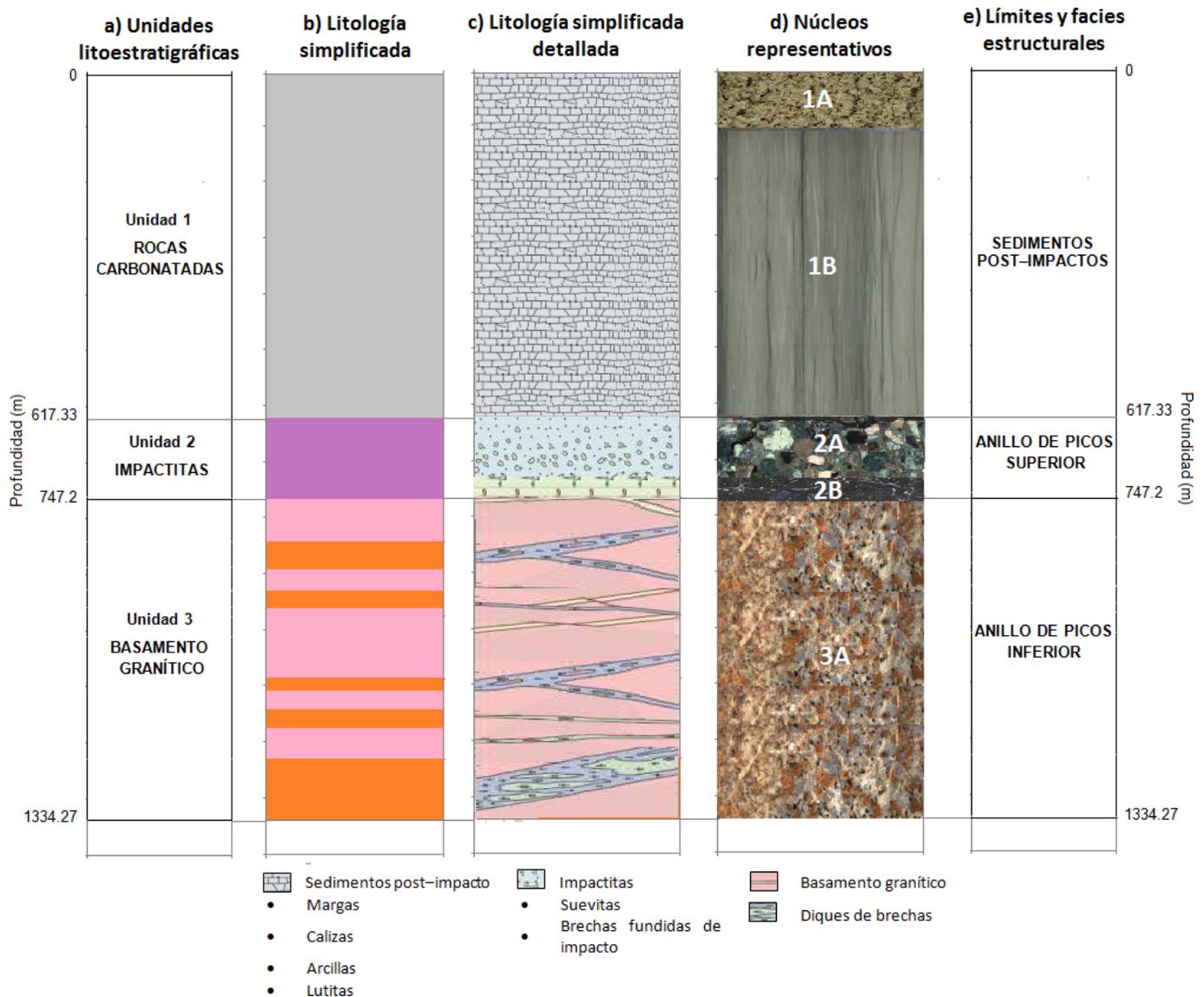


Figura 13. Modelo petrofísico del pozo M0077A: (a) unidades litoestratigráficas; (b) litología simplificada; (c), litología simplificada detallada; (d) imágenes de núcleos representativos; y (e), límites y facies estructurales.

trucción de un modelo petrofísico general que incluye la visualización de las litologías e interpretación estructural.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo a CONAHCYT por otorgar los recursos necesarios para desarrollar este proyecto. También la revisión crítica y comentarios de los revisores de la RMCG. El estudio está basado en los resultados y datos adquiridos en el proyecto de perforaciones Chicxulub en el anillo de picos, dentro de la IODP-ICDP Expedición 364. Agradecemos el acceso a los datos y reportes de la Expedición 364 en los Proceedings de IODP.

REFERENCIAS

Al-Marzouqui, M.I., Budebes, S., Sultan, E., Bush, I., Griffiths, R., Gzara, Kaïs, Ramamoorthy, Raghu, Husser, A., Jeha, Z., Roth, J., Montaron, B., Narhari, R., Singh, S.K., Poirier-Coutansais, X., Resolving carbonate

complexity: Oil Field Review, 22(2), 40-55.

- Barros-Galvis, N., Villaseñor, P., Samaniego, F., 2015, Analytical modeling and contradictions in limestones reservoirs: Breccias, vugs and fractures: Journal of Petroleum Engineering, ID 895786.
- Busch, J.M., Fortney, W.G., Berry, L.N., 1987, Determination of lithology from well logs by statistical analysis: SPE formation evaluation, 2(04), 412-418.
- Christeson G.L., Gulick S.P.S., Morgan J.V., Gebhardt C., Kring D.A., Ber E. Le., Loti J., Nixon Poelchau C.P., Rae, A.S.P., Rebolledo Vieya, M., Riller, U., Schmitt, D.R., Wittmann, A., Bralower, T.J., Chenot, E., Claeys, P., Cockell, C.S., Coolen, M.J.L., Ferriere, L., Green, S., Goto, K., Jones, H., Lowery, C.M., Mellett, C., Ocampo-Torres, R., Perez-Cruz, L., Pickersgill, A.E., Rasmussen, C., Sato, H., Smit, J., Tikoo, S.M., Urrutia-Fucugauchi, J., Whalen, M.T., Xiao, L., Yamaguchi, K.E. 2018, Extraordinary rocks from the peak ring of the Chicxulub impact crater: P-wave velocity, density, and porosity measurements from IODP/ICDP Expedition 364: Earth and Planetary Science Letters, 495, 1-11.
- Collins, G.S., Melosh, H.J., Morgan, J.V., Warner, M.R., 2002, Hydrocode Simulations of Chicxulub Crater Collapse and Peak-Ring Formation: Icarus, 157, 24-33, <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6822>.
- Collins, G.S., Morgan, J., Barton, P., Christenson G.L., Gulick, S., Urrutia, J., Warner M., Wünnemann K., 2008, Dynamic modeling suggests

- terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters* 270, 221-230, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.032>.
- Gulick, S., Morgan J., Mellett, C.L., Green, S.L., Bralower, T., Chenot, E., Christeson, G., Claeys, P., Cockell, C. Coolen, M.J.L., Ferrière, L., Gebhardt, C., Goto, K., Jones, H., Kring, D., Lofi, J., Lowery, C., Ocampo-Torres, R., Perez-Cruz, L., Pickersgill, A.E., Poelchau, M., Rae, A., Rasmussen, C., Rebolledo-Vieyra, M., Riller, U., Sato, H., Smit, J., Tikoo, S., Tomioka, N., Urrutia-Fucugauchi, J., Whalen, M., Wittmann, A., Yamaguchi, K., Xiao, L., Zylberman, W., 2017a, Site M0077A: Upper Peak Ring: International Ocean Discovery Program (IODP) Publications, <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.364.106.2017>
- Gulick, S., Morgan, J., Mellett, C., and the Expedition 364 Scientists, 2017b, Expedition 364 Preliminary Report: Chicxulub: Drilling the K-Pg Impact Crater: International Ocean Discovery Program (IODP), [dx.doi.org/10.14379/iodp.pr.364.2017](https://doi.org/10.14379/iodp.pr.364.2017).
- Gulick, S., Christeson, G., Barton, P., Grieve, R., Morgan, J., Urrutia Fucugauchi, J., 2013, Geophysical characterization of Chicxulub crater: *Reviews of Geophysics*, 51, 31-52, paper 2012RG000413, doi: 8755-209/13/10.1002/rog.20007.
- Gulick, S., Barton, P., Christeson, G., Morgan, J., MacDonald, M., Mendoza, K., Urrutia Fucugauchi, J., Vermeesch, P., Warner, M., 2008, Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater: *Nature Geoscience*, 1, 131-135.
- Kring, D.A., Hörz, F., Zurcher, L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2004, Impact lithologies and their emplacement in the Chicxulub impact crater: Initial results from the Chicxulub Scientific Drilling Project, Yaxcopoil, Mexico. *Meteoritics and Planetary Science*, 39, 879-898.
- Lai, J., Wang, G., Fan, Q., Pang, X., Li, H., Zhao, F., Li, Y., Zhao, X., Zhao, Y., Huang, Y., Bao, M., 2022, Geophysical well-log evaluation in the era of unconventional hydrocarbon resources: a review on current status and prospects. *Surveys in Geophysics*, 43(3), 913-957.
- Lofi, J., Smith, D., Delahunty, C., Le Ber, E., Brun, L., Henry, G., Paris, J., Tikoo, S., Zylberman, W., Pezard, P.A. Célérier, B., Expedition 364 Science Party, 2018, Drilling-induced and logging-related features illustrated from IODP-ICDP Expedition 364 downhole logs and borehole imaging tools: *Scientific Drilling*, 24, 1-13.
- Marin, L., Sharpton, V.L., Urrutia-Fucugauchi, J., Smit, J., Sikora, P., Carney, C. Rebolledo-Vieyra, M., 2001, Stratigraphy at ground zero: a contemporary evaluation of well data in the Chicxulub impact basin: *International Geology Review*, 43, 1145-1149.
- Morgan, J., Gulick, S., 2017, IODP-ICDP Expedition 364: Drilling the peak ring of the Chicxulub impact structure: *Lunar and Planetary Science*, XLVIII, 2 pp.
- Morgan, J.V., Christeson, G.L., Gulick, S.P.S., and Expedition 364 scientists, 2017, High-resolution imaging of the Chicxulub impact basin, en 48th Lunar and Planetary Science, Conference: The Woodlands, TX, EUA, Universities Space Association (USRA), abstract, 1318, 2 pp.
- Morgan, J.V., Gulick, S.P.S., Bralower, T., Chenot, E., Christeson, G., Claeys, P., Cockell, C., Collins, G., Coolen, M.J.L., Ferrière, L., Gebhardt, C., Goto, K., Jones, H., Kring, D., Le Ber, E., Lofi, J., Long, X., Lowery, C., Mellet, C., Ocampo-Torres, R., Osinski, G., Perez-Cruz, L., Pickersgill, A., Pöschau, M., Rae, A., Rasmussen, C., Rebolledo-Vieyra, M., Riller, U., Sato, H., Schmitt D., Smit, J., Tikoo-Schantz, S., Tomioka, N., Urrutia-Fucugauchi, J., Whalen, M., Wittmann, A., Yamaguchi K.E., Zylberman, W., 2016, The formation of peak rings in large impact craters: *Science* 354(6314), 878-882, DOI: 10.1126/science.aah6561.
- Morgan, J., Christeson, G., Gulick, S., Grieve, R., Urrutia, J., Barton, P., Rebolledo, M., Melosh, J., 2007, Joint IODP/ICDP Scientific Drilling of the Chicxulub Impact Crater: *Scientific Drilling*, 4, 42-44.
- Morgan, J., Warner, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Gulick, S., Christeson, G., Barton, P., Rebolledo-Vieyra, M., Melosh, J., 2005, Chicxulub crater seismic survey prepares way for future drilling: *EOS, Trans., American Geophysical Union*, 86(36), 325-328, <https://doi.org/10.1029/2005EO360001>.
- Morgan, J., Buffler, R., Urrutia Fucugauchi, J., Grieve, R., 2002, Chicxulub: Drilling the K-T Impact Crater: *Publicaciones, Instituto de Geofísica, UNAM, Serie Infraestructura Científica y Desarrollo Tecnológico*, no. 4, p. 39.
- Penfield G. T., Camargo-Zanoguera A., 1981, Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetism and gravity, en *Technical Program, abstracts and bibliographies*, 51st Annual Meeting: Tulsa, Oklahoma Society of Exploration Geophysicists, p. 37.
- Rebolledo Vieyra, M., Urrutia Fucugauchi, J., 2004, Magnetostratigraphy of the impact breccias and post-impact carbonates from borehole Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico: *Meteoritics and Planetary Sciences*, 39, 821-830.
- Stöffler, D., Grieve, R.A.F., 2007, Impactites, in Fettes, D., Desmons, J. (eds.), *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*: Cambridge, UK, Cambridge University Press, 82-92.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Pérez-Cruz, L., Morgan, J., Gulick, S., Wittmann, A., Lofi, J., 2019, Peering inside the peak ring of the Chicxulub Impact Crater—its nature and formation mechanism: *Geology Today*, 35(2), 68-72, <https://doi.org/10.1111/gto.12261>.
- Urrutia-Fucugauchi J., Camargo Zanoguera, A., Pérez Cruz, L., Pérez Cruz, G., 2011, The Chicxulub multiring impact crater, Yucatan carbonate platform, Mexico: *Geofísica Internacional*, 50, 99-127.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Chávez, J.M., Perez Cruz, L., de la Rosa, J.L., 2008, Impact ejecta and carbonate sequence in the Eastern Sector of Chicxulub Crater: *Comptes Rendus Geosciences*, 341, 801-810, doi:10.1016/j.crte.2008.09.001.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Morgan, J., Stöffler, D., Claeys, P., 2004, The Chicxulub scientific drilling project (CSDP): *Meteoritics and Planetary Science*, 39, 787-790.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L., Trejo, A., 1996, UNAM scientific drilling program of Chicxulub impact structure—Evidence for a 300 kilometer crater diameter: *Geophysical Research Letters*, 23, 1565-1568.
- Vermesch, P.M., Morgan, J.V., 2008, Structural uplift beneath the Chicxulub impact structure: *Journal of Geophysical Research*, 113 (B7), B07103, <https://doi.org/10.1029/2007JB005393>.

Manuscrito recibido: noviembre 24, 2023

Manuscrito corregido recibido: mayo 13, 2024

Manuscrito aceptado: mayo 14, 2024