

GEOFORMAS Y ESTRUCTURAS DE ESCAPE DE FLUIDOS DETECTADOS CON SÍSMICA DE ALTA RESOLUCIÓN EN LA CUENCA DEL COLORADO

Nadía A. Páez Rubia¹, José L. Taillant¹, Roberto A. Violante², Gemma Ercilla³, Juan Rengel Ortega⁴

1: Instituto Geofísico Sismológico F. Volponi, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Ruta 12 km 17, C.P. 5407, Marquésado, Rivadavia, San Juan, Argentina.

nadiaprubia@gmail.com, jltailanta@hotmail.com.

2: Servicio de Hidrografía Naval, Departamento Oceanografía, División Geología y Geofísica Marina.

Montes de Oca 2124, Buenos Aires C1270ABV, Argentina. violante@hidro.gov.ar

3: Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, Paseo Marítimo de la Barceloneta, 37-49, 08003 Barcelona, España. gemma@icm.csic.es

4: Instituto Hidrográfico de la Marina, Plaza San Severiano, 3, 11007 Cádiz, España. jrenortega@fn.mde.es

Palabras clave: Pockmarks, Hidrocarburos, Cuenca del Colorado, Plataforma Continental Argentina

ABSTRACT

This contribution analyzes the morphological structures of the seabed related to hydrocarbon escape. The study area is in the southern part of the Colorado Basin, between 38° and 41° south latitude. This work covers only the outer shelf from 80 m deep to the limit with the continental slope.

To carry out this study, bathymetric data were used. The data were obtained with multibeam bathymetric echosounder (EM-1002). Whose resolution is 2° x 2°. This probe is designed to work in shallow and medium depths (2 m and 700 m) with a sweep width of up to 150 and a working frequency of 95 kHz. Very high-resolution seismic profiles obtained with the TOPAS parametric probe were used.

The data set was acquired during the MIXTO campaign in March 2016. For the construction of the derived models software SAGA (System for Automated Geoscientific Analyzes) was used. For the seismic interpretation, the Petrel software was used.

The analysis of the bathymetry, allowed us to recognize and measure the different seabed structures. Among them mounds, pockmarks and mud volcanoes were identified. Very high resolution seismic profiles made it possible to measure the amplitude, frequency and continuity of the seismic reflectors. The combined use of digital elevation models and very high-resolution seismic profiles allow: a quantitative description (width, slope, length, etc.) and a plan description (shape, area, perimeter, symmetry, etc.). This information contributes to broadening the knowledge of the Argentine continental shelf seabed. Also, it demonstrates the usefulness of knowing the background morphological structures for hydrocarbon prospecting.

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo en las últimas décadas de nuevas técnicas de exploración oceánicas, se han publicado numerosos estudios relacionados con estructuras de escape de fluidos. Es de

especial interés reconocer áreas con gas somero, que es aquel que se acumula a una profundidad menor a los 1000 m debajo del fondo marino. El gas somero significa un riesgo cuando se coloca una plataforma de exploración o al momento de perforar un pozo, no obstante, proporciona información sobre mecanismos de migración de fluidos.

Algunas de las anomalías que se encuentran en los registros sísmicos y se asocian con escapes de fluidos son: apantallamiento acústico, reflector remarcado, chimeneas de gas, domamientos, turbidez acústica, transparencia acústica, entre otras (Judd & Hovland 2009; García-Gil *et al.* 1999). En cuanto a los elementos morfológicos que podrían evidenciar presencia de gas somero en los fondos marinos se puede mencionar: *pockmarks*, volcanes de lodo, montículos carbonatados y domamientos.

Los *pockmarks* son depresiones circulares u ovaladas generados por la expulsión de fluidos (a menudo gas) desde el subsuelo hacia la columna de agua, desestabilizando los sedimentos y produciendo colapsos (Judd & Hovland 2009, Løseth *et al.* 2009). Cuando los sedimentos son demasiado impermeables impiden el paso de los fluidos y se provoca una acumulación de estos, lo que causa un domamiento en el fondo marino. En referencia a los volcanes de lodo, estos se forman por constantes extrusiones de fango a través de fallas o fracturas.

Ciertos autores reconocen la presencia de gas natural en la cuenca del Colorado, como los trabajos de Loegering *et al.* (2010) y Anka *et al.* (2014) donde identifican, caracterizan y mapean indicadores de fuga de gas (chimeneas de gas, bolsas de gas, *pockmarks* y montículos) en la plataforma y talud continental. Anteriormente, durante la campaña realizada en el 2001 para YPF por el buque oceanográfico ARA Puerto Deseado, se recuperaron 40 muestras (*piston cores*) de las cuales la mayoría indicaron la presencia de gas termogénico en varios sectores del fondo marino. Asimismo, se realizó la detección de emanaciones naturales de petróleo (*Oil Slicks*) a partir de utilización de imágenes radar en observaciones a través del tiempo (Mancilla *et al.* 2002, Haring *et al.* 2002; Vayssaire *et al.* 2007; Gerster *et al.* 2011).

La zona de trabajo es parte de la plataforma continental Argentina, entre los 38° y 41° de latitud sur (Fig. 1), desde los 80 m hasta los 172 m de profundidad, abarcando un área de 16,500 km². Aborda las características morfológicas y evidencias presentes en los registros geofísicos de alta resolución, de las distintas morfologías del fondo marino, generalmente asociadas a emisiones submarinas de hidrocarburos.

El estudio forma parte de las investigaciones en el Margen Continental Argentino en el contexto del Proyecto MARGEN llevado a cabo por el Servicio de Hidrografía Naval (Violante *et al.* 2017), con colaboraciones internacionales, con el fin de estudiar la evolución, dinámica y procesos sedimentarios en el territorio marítimo.

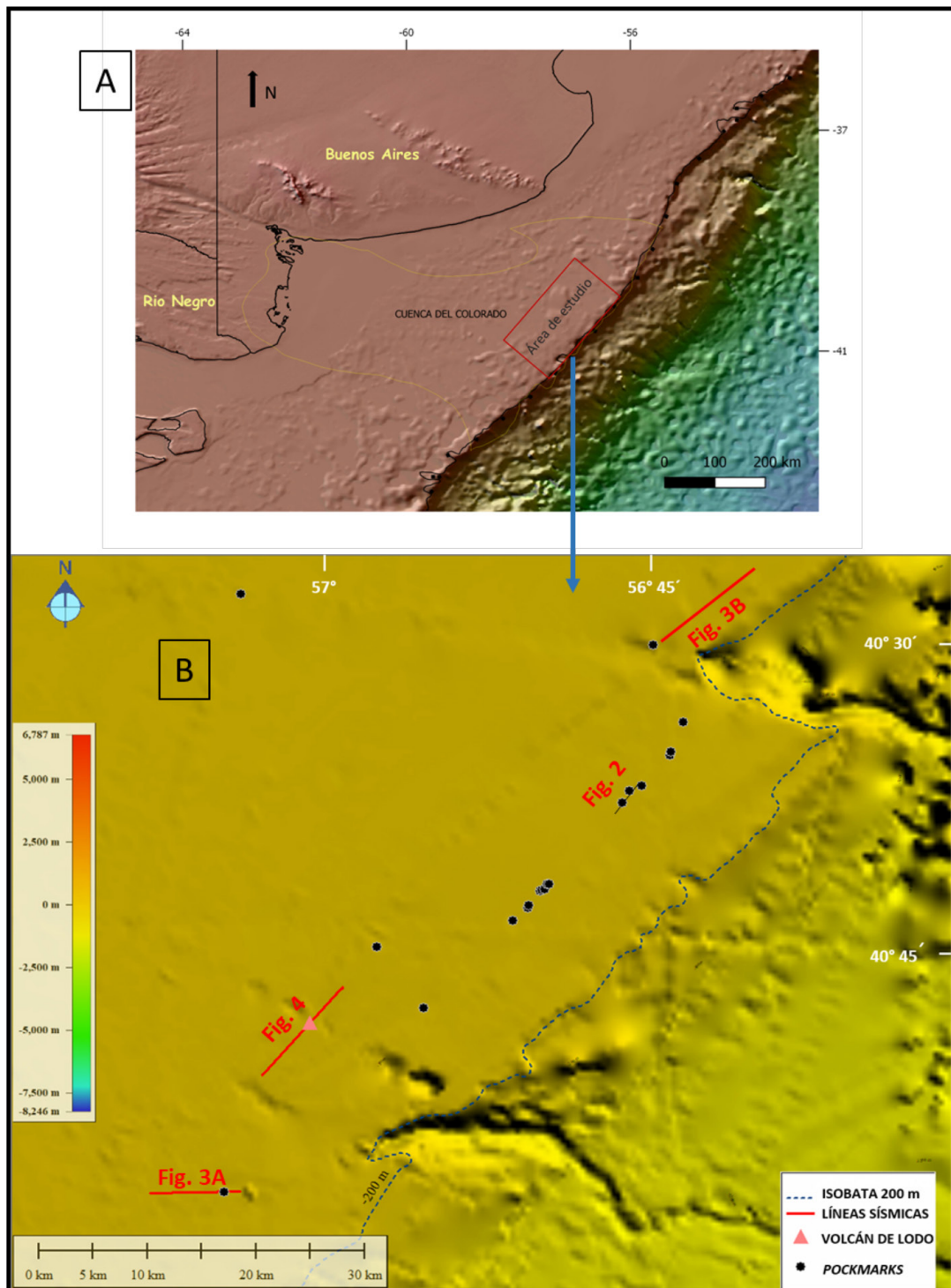


Figura 1. Localización del área de estudio en la Plataforma Continental Argentina. (A) Delimitación de la Cuenca del Colorado (línea amarilla). (B) Ubicación de las estructuras asociadas a escapes de fluidos y ubicación de las líneas sísmicas y perfiles utilizados en este trabajo.

MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO

Desde el punto de vista geodinámico, la cuenca del Colorado se desarrolla sobre el margen de tipo pasivo. En márgenes pasivos la actividad tectónica, volcánica y sísmica es baja ya que se ubican dentro de la placa litosférica. Son zonas donde se acumulan sedimentos o material procedente del continente (áreas emergidas).

La cuenca del Colorado fue interpretada como aulacogénica (de Wit 1977) la cual intersecta transversalmente el borde continental atlántico de Sudamérica. El desarrollo de la misma está vinculada a procesos de fracturación extensional y discontinuidades corticales, reactivadas durante la apertura del Atlántico Sur alrededor de los 137 Ma. (Franke *et al.* 2007).

Después de un período *pre-rift* del Pérmico, la formación de la cuenca del Colorado está relacionada con la ruptura de Gondwana, comenzando con los sistemas de *rift* del Triásico/Jurásico (?) hasta el Cretácico Inferior, seguido de un período de hundimiento térmico a través del Cretácico y finalmente alcanzando la configuración de margen pasivo actual de la cuenca. El basamento está compuesto por rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrica. El estadio de hundimiento térmico comprende sedimentitas depositadas entre el Cretácico superior, asignadas a las formaciones Fortín y Colorado. La secuencia de margen pasivo inicia con una transgresión

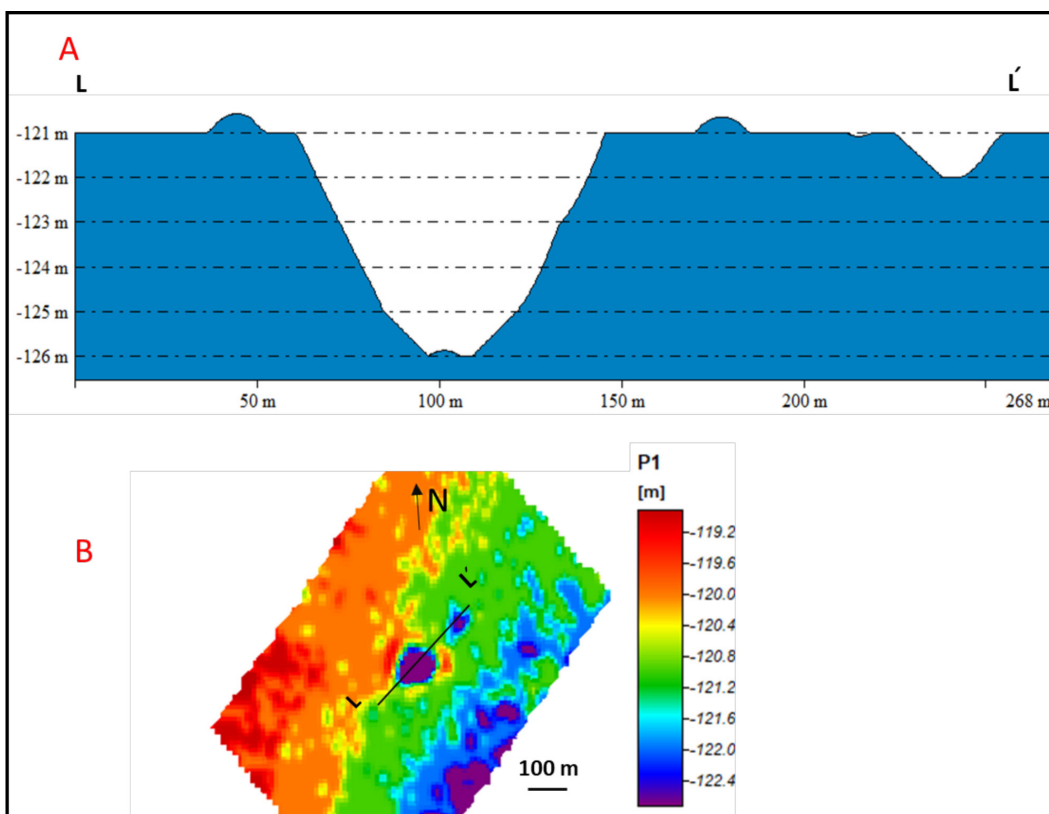


Figura 2. A. Perfil batimétrico de un *pockmark*. B. Mapa batimétrico con ubicación del perfil (línea negra). Ver ubicación de los perfiles en la Figura 1.

regional, completa la columna (Maastrichtiano-Cenozoico), un conjunto de sedimentos que muestran una transición de ambiente fluvial-deltaico y marino somero a un ambiente marino más profundo hacia el borde de la plataforma (Fryklund *et al.* 1996; Bushnell *et al.* 2000).

METODOLOGÍA

Este estudio analiza e interpreta un conjunto de datos adquiridos con técnicas acústicas marinas de diverso tipo y escala de resolución, como son la adquisición de datos batimétricos con sondas multihaz (EM 1002 para aguas someras) y perfiles de sísmica de muy alta resolución (sonda paramétrica Topas). Los datos proceden de la campaña oceanográfica MIXTO realizada en marzo de 2016 a bordo del buque de investigaciones español Hespérides. Para realizar el mapa base se utilizó la batimetría de dominio público GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) edición 2021 (GEBCO *Compilation Group*, 2021)

En total se analizaron 805 km de líneas sísmicas y alrededor de 4500 km² de batimetría.

Los registros obtenidos con las sondas multihaz se emplearon para generar un MDE (Modelo Digital de Elevación) del cual se derivaron aspectos geomorfológicos como la pendiente y la rugosidad. Los mapas derivados se emplearon para detectar rápidamente anomalías en el fondo marino, mientras que los perfiles de sísmica de muy alta resolución se utilizaron para individualizar las geoformas reconocidas en base a la amplitud, frecuencia y continuidad de los reflectores sísmicos.

La utilización combinada de los datos batimétricos y los perfiles sísmicos de muy alta resolución, permitieron, además de identificar diferentes morfologías, realizar una descripción cuantitativa (ancho, pendiente, longitud, etc.) y cualitativa (forma, simetría, etc.) de las distintas estructuras submarinas.

RESULTADOS

A través de métodos indirectos (sísmica de reflexión de alta resolución y registros sísmicos multihaz) se interpretaron diferentes estructuras relacionadas con escapes de fluidos. La presencia de los mismos en los sedimentos de la plataforma continental se evidencia en los perfiles sísmicos por la ocurrencia de: a) morfologías en forma de cráter b) apantallamiento acústico c) turbidez acústica y d) volcán de lodo.

Las mismas se detallan a continuación:

a) Morfologías en forma de cráter “pockmarks”

Se reconocieron un total de 20 *pockmarks*, restringiéndose a una zona ubicada entre los 110 y 130 m de profundidad. Las mismas se encuentran de forma aislada o en grupo.

En cuanto a las características morfológicas, la mayoría presenta forma simétrica en planta, mientras que solo unos pocos presentan formas alargadas asimétricas. La profundidad interna varía de 2 a 7 m, pero la mayoría tiene 3 m. Los diámetros de los *pockmark* simétricos varían de 0,3 a 0,85 km (Fig. 2). En el caso de los *pockmarks* asimétricos el eje mayor llega en algunos casos a los 1,1 km y no indica una orientación preferencial. En corte, predominan los perfiles en forma de “U”, seguidos por formas en “V”. En los perfiles sísmicos, se observan como depresiones que se encuentran encima de zonas con anomalías acústicas (Fig. 3A).

b) Los apantallamientos acústicos

Son una fuerte reflexión o una reflexión con mayor amplitud. Se reconocen por producir un enmascaramiento acústico del registro sísmico. La extensión lateral es de aproximadamente 1.8 km, encontrándose a poca profundidad del fondo oceánico (4 ms). El reflector tiene una geometría plana, la parte superior se presenta como una superficie irregular y los bordes son difusos (Fig. 3A).

c) Turbidez acústica.

Estas anomalías también se observan en los registros sísmicos interrumpiendo la estratificación del subsuelo. Se encuentran acompañados de reflexiones de mayor amplitud (*enhanced reflection*). La acumulación de gas produce un leve domamiento del fondo marino. Los domos son de bajo relieve (aproximadamente 1 m) y un ancho de centenas de kilómetros (Fig. 3 B).

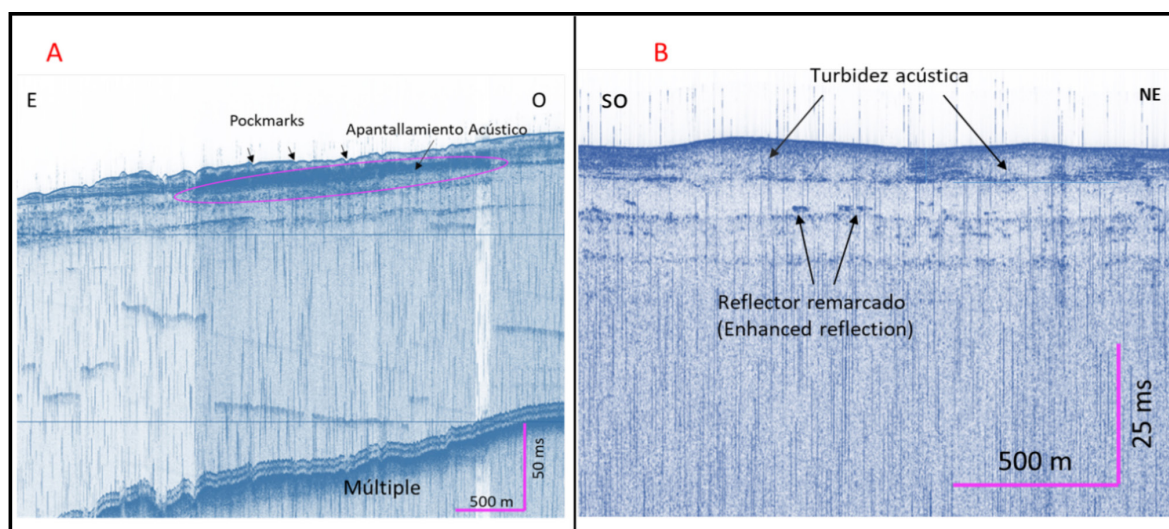


Figura 3. A. Registro sísmico de muy alta resolución (TOPAS) donde se observa un apantallamiento acústico debido a la presencia de una acumulación de gas muy próxima a la superficie del fondo actual. Se distinguen también la presencia de *pockmarks*. B. Perfil sísmico donde se observa turbidez acústica y un reflector remarcado (*enhanced reflection*). Ver ubicación de los perfiles en la Figura 1.

d) Volcán de lodo

Se encuentra a 110 metros de profundidad, sobresaliendo en los registros de la batimetría multihaz. Presenta una forma arqueada de bajo relieve, unos 13 m de altura sobre el fondo marino (Fig. 4B). El diámetro, medido en el fondo del mar es de unos 300 m. Las pendientes no son uniformes, mientras que la pendiente del flanco SO mide alrededor de 4° , la pendiente NE mide 9° . El flanco SO se encuentra bordeado por una zona deprimida. La respuesta acústica observada en el perfil sísmico, es transparente en la parte interna del cono y en la parte superior se encuentran facies altamente reflectivas. La facies acústica transparente en profundidad se extiende unos 200 m desde el eje de la estructura y tiene un espesor estimado de 35 ms. Otra característica distintiva que se puede reconocer es la inclinación de algunos reflectores hacia abajo (Fig. 4A).

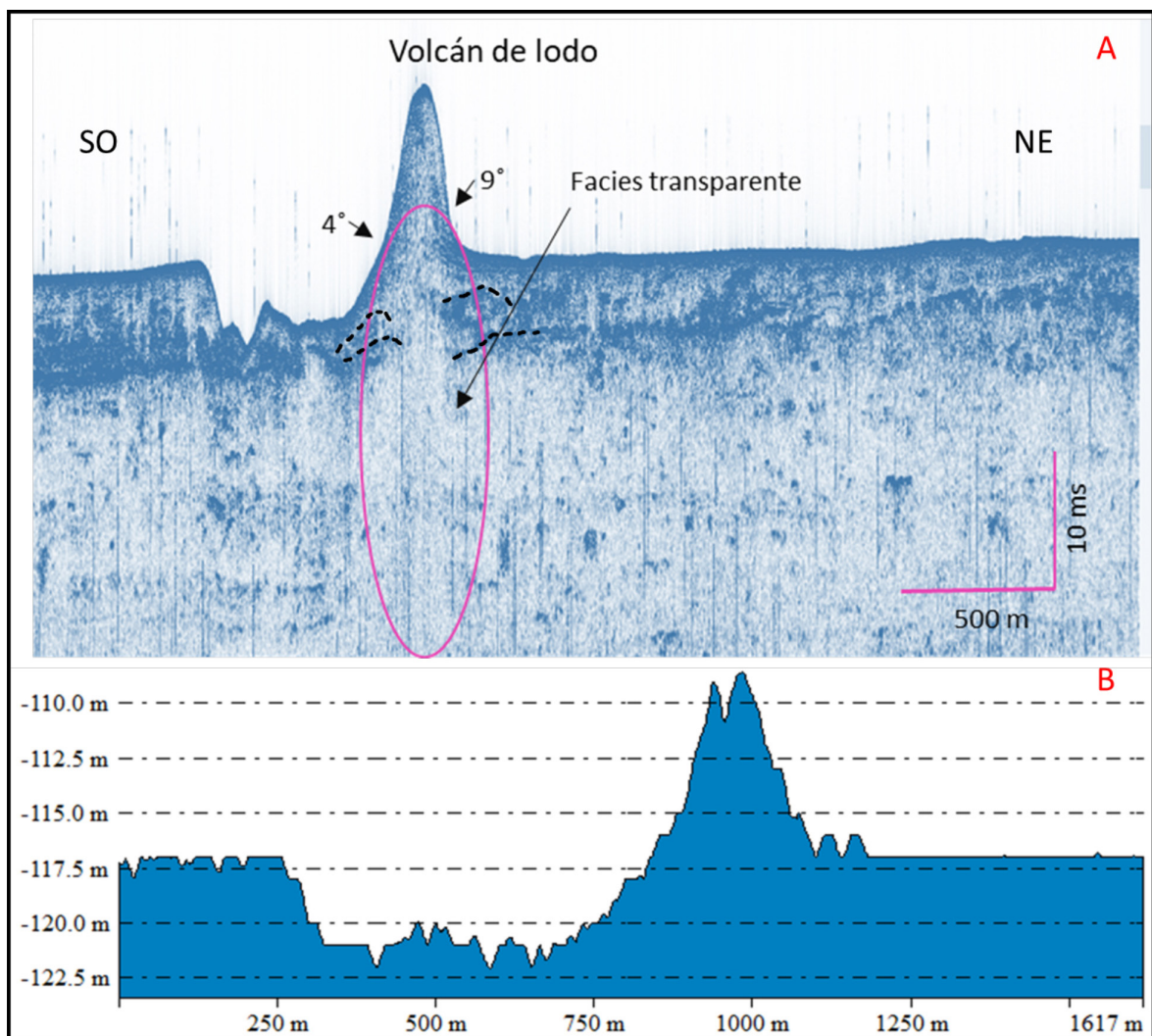


Figura 4. A. Perfil de sísmica de muy alta resolución donde se observan un volcán de lodo que se desarrollan sobre el fondo marino, en el subsuelo se distinguen facies sísmicas transparentes y reflectores inclinados hacia abajo. B. Perfil batimétrico del volcán de lodo. Ver ubicación en la Figura 1.

CONCLUSIONES

La presencia de fluidos en los sedimentos de la plataforma exterior continental se evidencia por apantallamientos acústicos, turbidez acústica, facies transparentes y reflectores remarcados (*enhanced reflection*) en los perfiles sísmicos. En los registros de ecosonda multihaz se observaron morfologías negativas en forma de cráter, interpretadas como *pockmarks* y elementos positivos tales como domamientos y un monte submarino interpretado como un volcán de lodo.

Se encontraron 20 *pockmarks*, en su mayoría simétricos. En base a la morfología se interpreta que los mismos se encuentran en la etapa de desarrollo, solo influenciados por la expulsión de fluidos y posterior erosión debido a las corrientes de fondo.

Los domamientos superficiales están asociados con turbidez acústica y reflectores remarcados (*enhanced reflection*). Por último, el volcán de lodo, afecta al menos 30 ms del registro sísmico y se encuentra acompañado de facies transparentes.

Las evidencias de fluidos en el fondo marino se restringen a la plataforma exterior, pudiendo extenderse al talud continental.

Los resultados presentados contribuyen a un mejor entendimiento de la geomorfología de la Plataforma Continental Argentina debido a que existen escasos antecedentes en esta área. Además, demuestran la utilidad que representa conocer las estructuras morfológicas de fondo para la prospección de hidrocarburos.

REFERENCIAS CITADAS

- Anka, Z., Loegering, M. J., Di Primio, R., Marchal, D., Rodríguez, J. F., & Vallejo, E., 2014. Distribution and origin of natural gas leakage in the Colorado Basin, offshore Argentina 2 Margin, South America: seismic interpretation and 3D basin modelling. *Geologica Acta*, p.269-285.
- Bushnell, D.C., Baldi, J.E., Bettini, F.H., Franzin, H., Kovaks, E., Marinelli, R., Wartenburg, G.J., 2000. Petroleum system analysis of the Eastern Colorado Basin, offshore Northern Argentina, in M.R. Mello (ed.). *Petroleum Systems of South Atlantic margins: American Association of Petroleum Geologist Memoir* 73, p. 403-415.
- De Wit, M. J., 1977. The evolution of the Scotia Arc as a key to the reconstruction of southwestern Gondwanaland. *Tectonophysics*, vol. 37 N°1-3, p. 53-81.
- Franke, D., Neben, S., Ladage, S., Schreckenberger, B., & Hinz, K., 2007. Margin segmentation and volcano-tectonic architecture along the volcanic margin off Argentina/Uruguay, South Atlantic. *Marine Geology*, vol. 244 N°1-4, p. 46-67.
- Fryklund, B., Marshall, A. y Stevens, J., 1996. Cuenca del Colorado. En: Ramos, V. A. y Turic, M. A. (Eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina*. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración.

- ación de Hidrocarburos. Relatorio, 8, p. 135-158. Buenos Aires.
- García-Gil, S., García-García, A., & Vilas, F., 1999. Identificación Sísmico-acústica de las Diferentes Formas de Aparición de Gas en los Sedimentos de la Ría de Vigo (NO España). *Revista de la Sociedad Geológica de España* vol. 12, N° 2, p. 301-307.
- GEBCO Compilation Group, 2021. GEBCO 2021 Grid (doi:10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f)
- Gerster, R., Welsink, H., Ansa, A., & Raggio, F., 2011. Cuenca de Colorado. In *Simpósio Cuencas Argentinas. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, IAPG p. 65-80.
- Haring, C., Mancilla, O., Figueroa, D., Soubies, D., Salinas, A., Meissinger, V., Ucha Vallo, N., De Santa Ana, H., Gaulier, J-M., Debarre, R., Smaghe, G., Granjeon, D. y Schmidt, S., 2002, Integrated stratigraphic and basin modeling study of a frontier offshore area: The Colorado basin, Argentina. *American Association of Petroleum Geologist Annual Meeting*, Houston, Texas.
- Judd, A. & Hovland M., 2009. *Seabed Fluid Flow, the Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Cambridge University, Cambridge, p. 72-73.
- Loefering, M., Anka, Z., Rodriguez, J., Marchal, D., di Primio, R., Vallejo, E., Kohler, G. & Pangaro, F., 2010. Identification, mapping, and analysis of possible evidences of active petroleum systems in the Colorado Basin, offshore Argentina, South America. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, p. 10426.
- Løseth, H., Gading, M., & Wensaas, L. 2009. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, vol.26, N°7, p.1304-1319.
- Mancilla, O. H., Salinas, A., Soubies, E. D., Debarre, R., & Granjeon, D. 2002. Exploration of a frontier area using numerical stratigraphical modeling-Application to the offshore Colorado basin of Argentina. In *American Association of Petroleum Geologist Annual Meeting*
- Vayssaire, A., Prayitno, W., Figueroa, D., & Quesada, S. 2007. Petroleum systems of Colorado and Malvinas basins, deep water Argentina, South Atlantic petroleum systems. *Geological Society of London*, p.10
- Violante, R.A., Burone, L., Mahiques, M. y Cavallotto, J.L., 2017. The Southwestern Atlantic Ocean: Present and past marine sedimentation. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, vol. 24, N° 1, p. 1-5.

