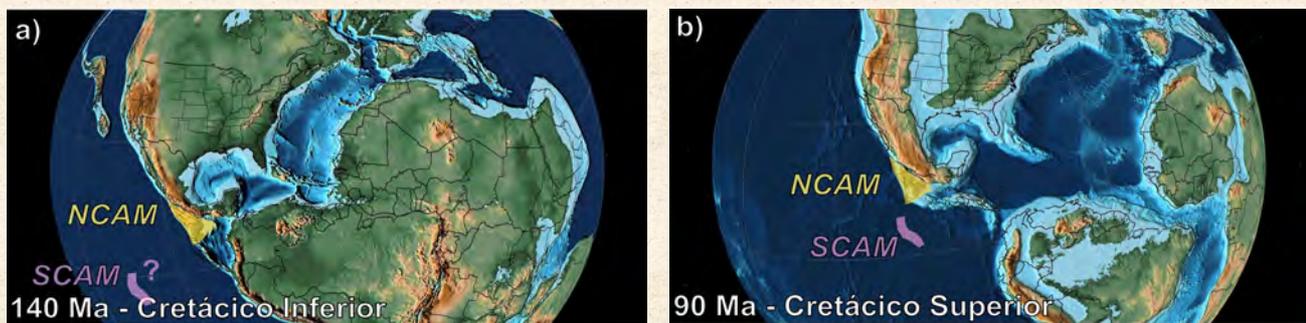


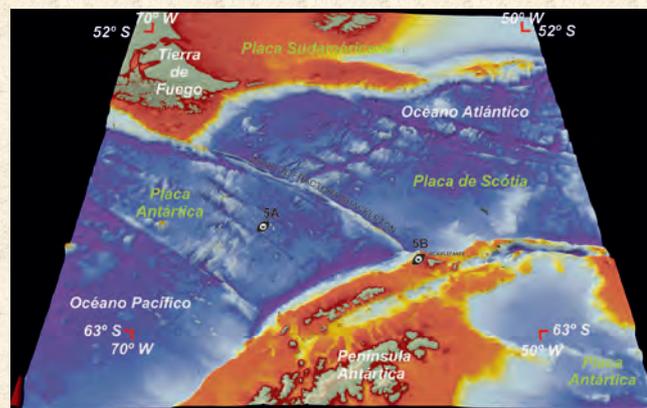
LA GEOLOGÍA ES NOTICIA

Evolución Tectónica de Centroamérica



José A. Álvarez Gómez, Jorde Alonso Henar y José J. Martínez Díaz _____ p. (350)

TECTÓNICA DE PLACAS Y CLIMA: la formación del Paso de Drake (Antártida)



Fernando Bohoyo, Jesús Galindo-Zaldívar, Adolfo Maestro, Carlota Escutia, Andrés Maldonado, Jerónimo López-Martínez y Grupo de Investigación Antártica TASMANDRAKE _____ p. (356)

TECTÓNICA DE PLACAS Y CLIMA: la formación del Paso de Drake (Antártida)

FERNANDO BOHOYO¹,
JESÚS GALINDO-ZALDÍVAR^{2,3},
ADOLFO MAESTRO¹,
CARLOTA ESCUTIA³,
ANDRÉS MALDONADO³,
JERÓNIMO LÓPEZ-MARTÍNEZ⁴ Y
GRUPO DE INVESTIGACIÓN ANTÁRTICA
TASMANDRAKE
(@TASMANDRAKE).

¹ Instituto Geológico y Minero de España.
Madrid.

² Departamento de Geodinámica,
Universidad de Granada.

³ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra,
CSIC-UGR. Granada.

⁴ Departamento de Geología y Geoquímica.
Universidad Autónoma de Madrid.

La apertura de los principales “estrechos” del Océano Austral o Antártico, los pasos de Drake y de Tasmania, que separan América del Sur y Australia de la Antártida respectivamente, permitió que se estableciera el actual patrón de circulación oceánica global. El amplio intercambio de agua entre las principales cuencas oceánicas condujo al desarrollo de la Corriente Circumpolar Antártica (CCA), que contribuyó al aislamiento térmico de la Antártida, fue parcialmente responsable del enfriamiento global en el límite Eoceno-Oligoceno y jugó un papel importante en el enfriamiento del planeta durante el Mioceno superior (Barker, 2001; Eagles y Jokat, 2014).

El Paso de Drake, de aproximadamente 850 km de ancho ubicado entre América del Sur y la Península

Antártica, conecta el Océano Pacífico con el Océano Atlántico e influye globalmente en los intercambios de flujo del manto litosférico, de masas de agua y de las migraciones de la biota que operan a través de él. Este pasillo oceánico se desarrolló en el marco de la evolución geológica del Arco de Scotia durante el Cenozoico (Maldonado *et al.*, 2014; Bohoyo *et al.*, 2019). Diferentes técnicas geofísicas permiten conocer su naturaleza y fisiografía e inferir su compleja evolución geodinámica.

Contexto geológico

El desarrollo del Arco de Scotia, que contiene varias dorsales de expansión oceánicas activas y extintas, está directamente relacionado con la apertura del Paso de Drake. Se ha desarrollado por la fragmentación continental o *rifting* de la conexión entre América del Sur y la Península Antártica durante las etapas finales de la ruptura de Gondwana, seguido por el inicio de la expansión del fondo oceánico en la Dorsal Occidental de Scotia (Fig. 1), desde el Eoceno superior y durante el Oligoceno (Eagles y Jokat, 2014). El Arco de Scotia incluye las placas tectónicas de Scotia y de Sandwich. Está limitado al norte y al sur por zonas de fallas activas transcurrentes de movimiento sinistral (el bloque o placa septentrional se desplaza de forma relativa hacia la izquierda respecto al bloque o placa meridional) denominadas Dorsal Norte y Dorsal Sur de Scotia (Fig. 1), que lo separan de las placas Sudamericana y Antártica, respectivamente. Al oeste,

el Arco de Scotia está limitado por la Zona de Fractura Shackleton, y al este por la Fosa de las Sandwich del Sur, producto de la subducción de la Placa Sudamericana bajo la Placa de Sandwich, configurando el límite convergente oriental del arco (Fig. 1). Las placas de Scotia y de Sandwich están separadas por un límite divergente, la dorsal de expansión Oriental de Scotia. (Figura 1; Barker *et al.*, 2001).

Sismicidad y lineaciones magnéticas

La distribución de los epicentros históricos de terremotos, extraídos de catálogos sísmicos como el ANSS del USGS, evidencian los actuales límites de placas alrededor del Arco de Scotia. La mayor parte de la actividad sísmica se concentra en el sector oriental del arco, donde la Placa Sudamericana subduce bajo la Placa Sandwich. Todos los eventos profundos (>150 km) e intermedios (50-150 km) se concentran aquí, mientras que el resto de los límites de placas están marcados por eventos superficiales (0-50 km). La segunda región con mayor actividad tectónica se localiza en la parte occidental de la Dorsal Sur de Scotia entre las Islas Shetland del Sur y las Islas Orcadas del Sur (Fig. 1). El análisis de los mecanismos focales de terremotos y los modelos globales de movimiento de placas (TLP2003 de Thomas *et al.*, 2003) apuntan a un régimen regional de esfuerzos caracterizado por una compresión de dirección NE-SO, y extensión perpendicular, con perturbaciones locales (Galindo-Zaldívar *et*

al., 1996; Maestro *et al.*, 2014; Bohoyo *et al.*, 2017).

La identificación de lineaciones de anomalías magnéticas del fondo oceánico y sus atribuciones cronológicas (cronos geomagnéticos de la escala de tiempo, Cande y Kent, 1995; Fig. 2) junto a una batimetría detallada, que reproduce fielmente la fábrica oceánica, permiten determinar la edad y distribución de la corteza oceánica junto a su velocidad y orientación de la expansión, fundamentales para conocer la evolución del Paso de Drake (BAS, 1985; Bohoyo *et al.*, 2019) (Fig. 2).

La Zona de Fractura Shackleton

La Zona de Fractura Shackleton (ZFS) ocupa una posición central y protagonista en el Paso de Drake y se manifiesta como una dorsal intraoceánica que se eleva de varios cientos a miles de metros sobre el fondo marino circundante (Fig. 3). La ZFS separa placas tectónicas y océanos, al este la Placa de Scotia

y al oeste la Placa Antártica (que incluye la antigua Placa Phoenix), y al este el Océano Pacífico y al oeste el Océano Atlántico. La ZFS es una falla transcurrente activa de carácter sinistral que junto con las dorsales Norte y Sur de Scotia acomodan el movimiento relativo entre las placas de Scotia, Sudamericana y Antártica y conecta la Fosa de Chile al norte con la Fosa de las Shetland del Sur al sur (Thomas *et al.*, 2003). La ZFS subduce, en su sector meridional, bajo la Isla Elefante (aquella donde quedó parte del equipo y tripulación de Shackleton, mientras él, valiéndose de una pequeña embarcación y aprovechando las corrientes superficiales y vientos hacia el este, llegó hasta la Isla Georgia del Sur donde consiguió ayuda), resolviendo un punto triple tipo FFS (Falla transformante-Falla transformante-Subducción, en este caso Zona de Fractura Shackleton-Dorsal Sur de Scotia-Zona de Subducción de las Shetland del Sur) (Figs. 1 a 3; Alda-

ya y Maldonado, 1996). La ZFS corta dos dorsales de expansión oceánica ahora extintas: la Dorsal Oeste de Scotia y la Dorsal Phoenix-Antártica (Fig. 2), entre las cuales la ZFS actuó como una falla transformante de dorsal a dorsal oceánica cuando ambos centros de expansión estaban activos. La evolución geodinámica de la región, la actividad sísmica y los datos tectónicos sugieren una evolución compleja para la ZFS que comenzó como una falla transformante intraoceánica con movimiento de salto en dirección a lo largo de la mayor parte de su longitud y que luego se convirtió en la actual zona de falla transcurrente compresiva. Por último, el levantamiento tectónico de la ZFS en los últimos 8 Ma, debido a esta situación compresiva, ha formado una barrera de hasta 2500 metros para las corrientes del fondo oceánico obligadas a sortearla progresivamente hacia el norte (Figs. 2 y 3; Maldonado *et al.*, 2000; Livermore *et al.*, 2004).

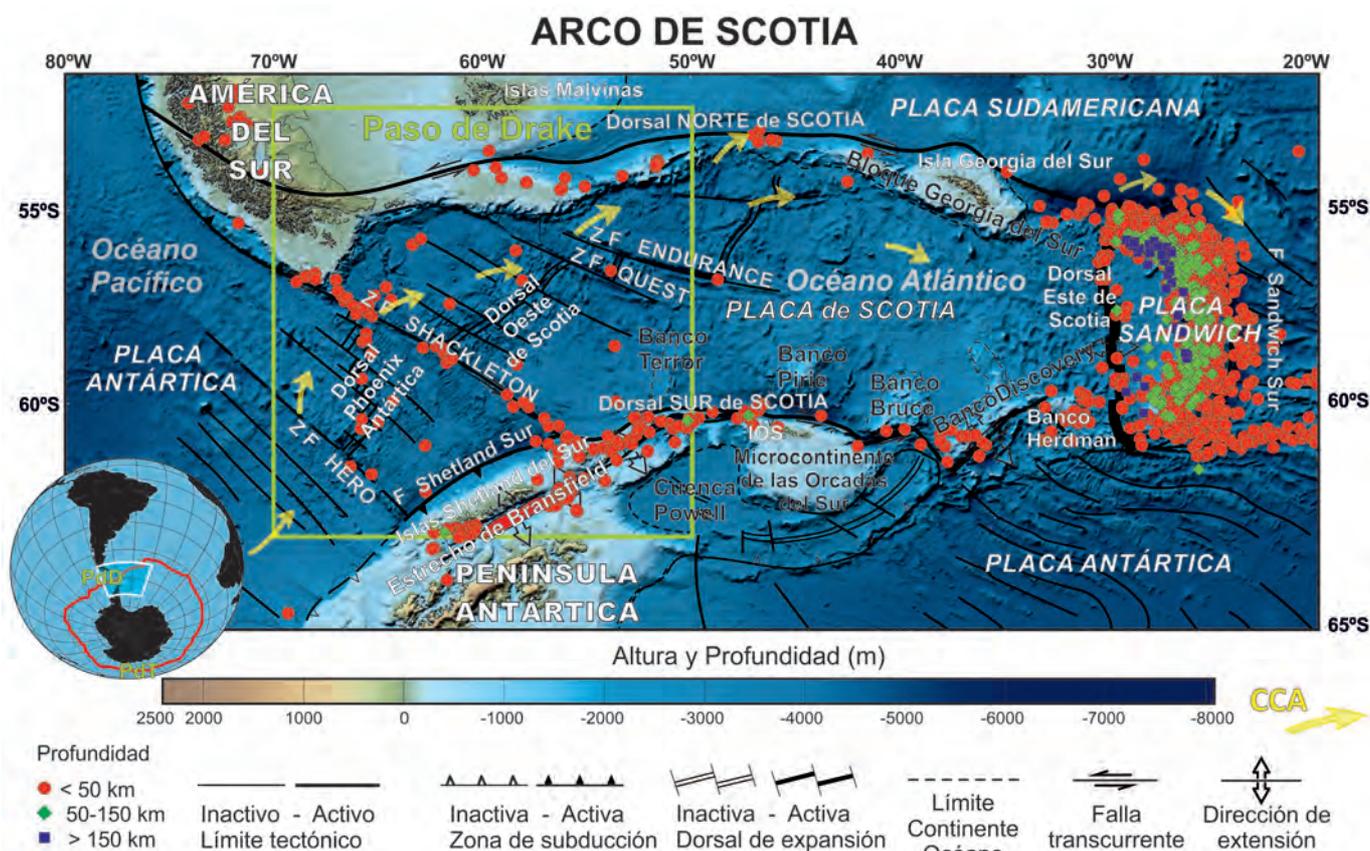


Fig. 1. Mapa tectónico del Arco de Scotia. El recuadro amarillo señala la situación del Paso de Drake. CCA: Corriente Circumpolar Antártica, F: Fosa, IOS: Islas Orcadas del Sur, y ZF: Zona de Fractura. Altura y profundidad extraídas de GEBCO (www.gebco.net). Los epicentros de terremotos están clasificados según su profundidad. En el globo (abajo a la izquierda) se indica la localización regional del Arco de Scotia y de los Pasos de Drake (PdD) y Tasmania (PdT). La línea roja señala la situación del Frente Polar. Se recomienda consultar la versión digital.

Las dorsales de expansión oceánica

Al oeste de la ZFS (Fig. 1), y entre esta y la Zona de Fractura Hero, se localiza la dorsal oceánica Phoenix-Antártica que cesó su expansión durante el cron magnético C2A (2,6-3,6 Ma), cuando la Placa Phoenix pasó a for-

mar parte de la Placa Antártica, y tras un largo período de subducción de la Placa Phoenix debajo del Margen Pacífico de la Península Antártica durante el Mesozoico superior y el Cenozoico. La fosa oceánica frente a las Islas Shetland del Sur, archipiélago donde se encuentran las dos bases antárticas

españolas, es producto de las últimas fases de subducción de esta placa y su principal mecanismo de desarrollo se relaciona con un proceso de retroceso o *roll-back* de la placa que subduce, unido a la expansión activa en la cuenca de retroarco o *back-arc* del Estrecho de Bransfield (Fig. 3) (Larter y

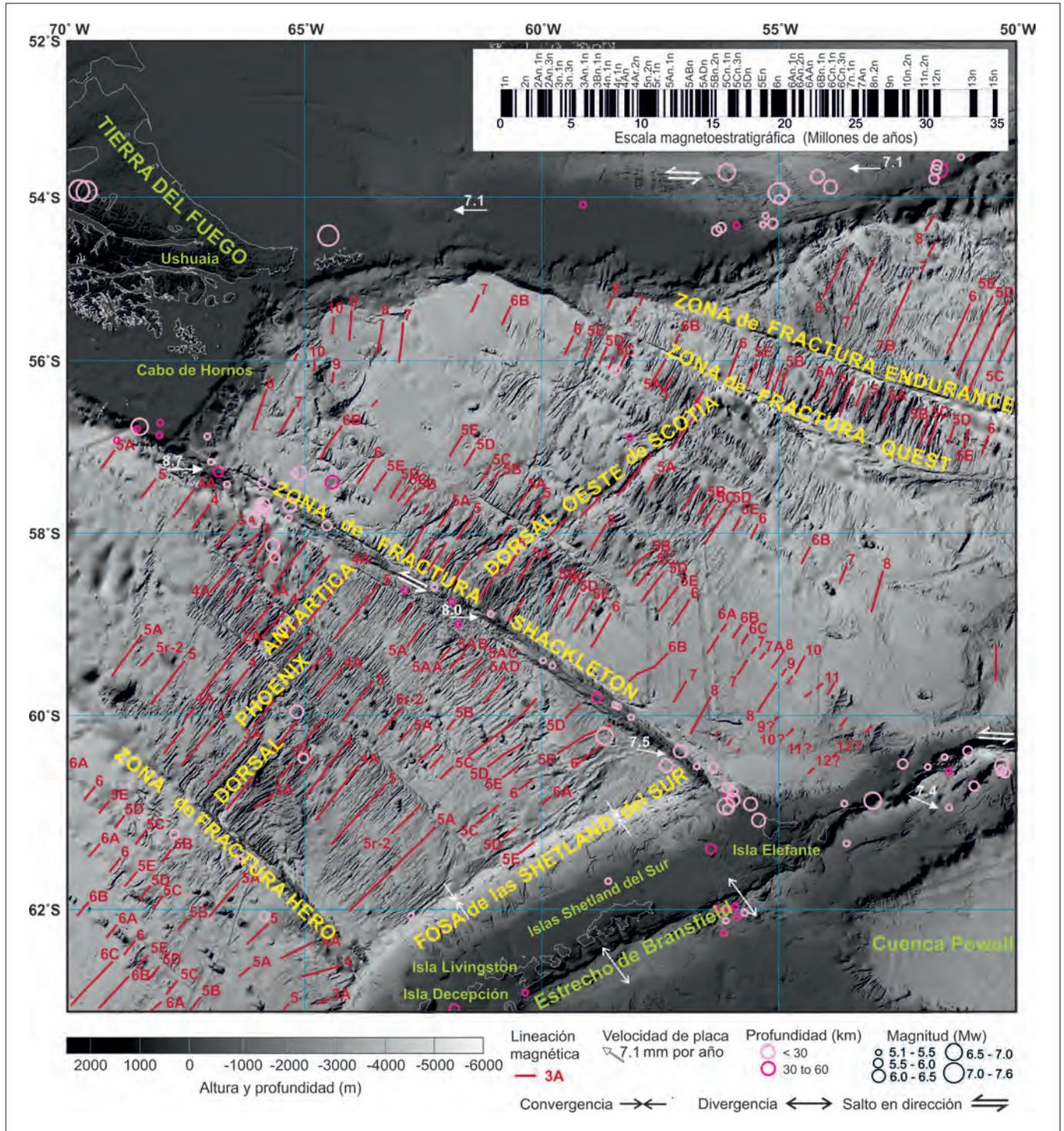


Fig. 2. Mapa batimétrico del Paso de Drake con la situación de las principales lineaciones magnéticas de fondo oceánico y de los epicentros de terremotos, clasificados por profundidad y magnitud. Las flechas blancas indican el tipo de régimen tectónico de las principales estructuras y las velocidades y dirección de movimiento de las placas tectónicas. La escala magnetoestratigráfica (Cande y Kent, 1995) señala los intervalos de polaridad normal (en negro) e inversa (blanco) y su atribución de edad en millones de años. Se recomienda consultar la versión digital.

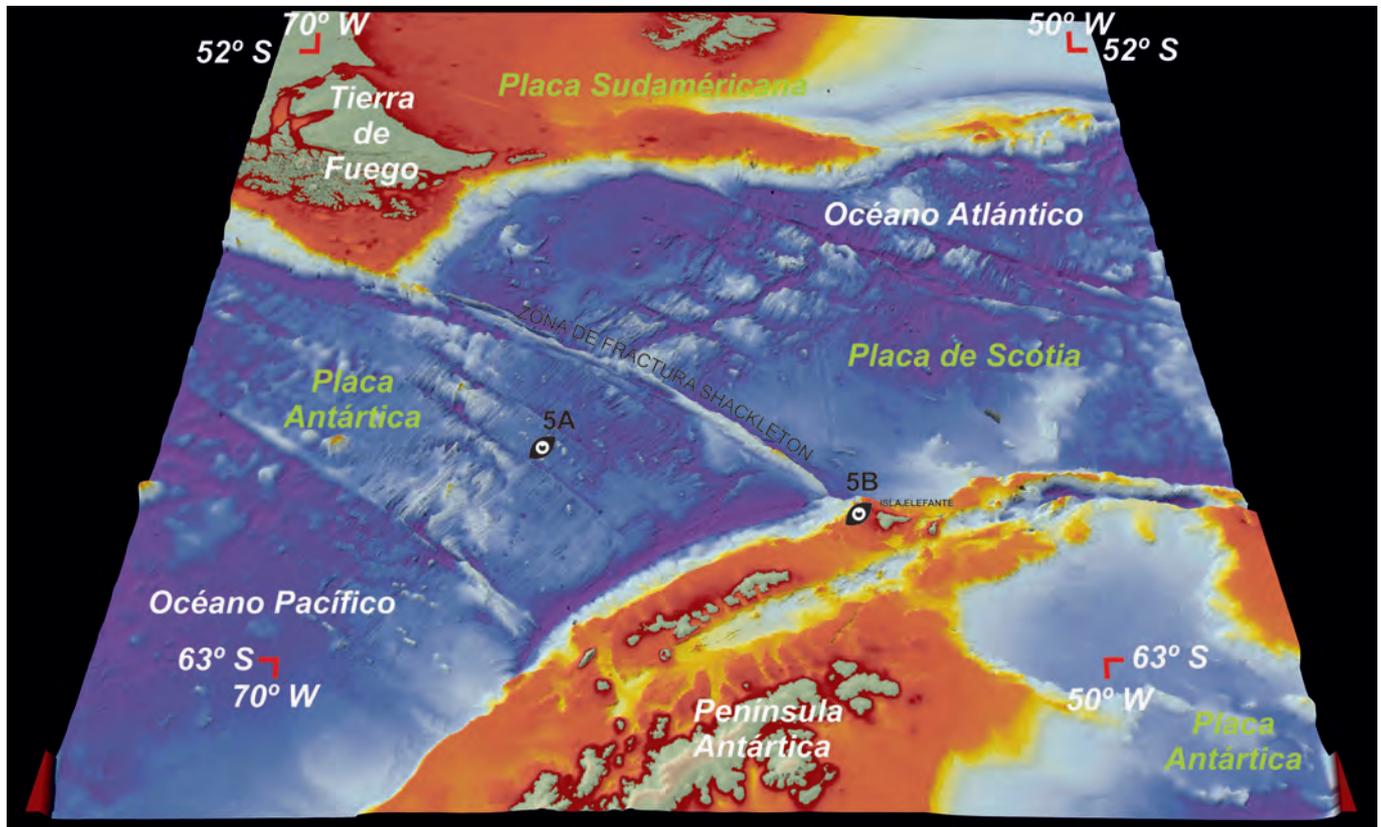


Fig. 3. Imagen batimétrica de detalle en tres dimensiones del fondo marino en el Paso de Drake realizada a partir de la base de datos de batimetría multihaz BATDRAKE (Bohoyo et al., 2019). El símbolo del ojo indica la posición y punto de vista de las figuras 5A y 5B. Consultar las figuras 1 y 2 para identificar los topónimos de las principales estructuras. Se recomienda consultar la versión digital.

Barker, 1991; Maldonado *et al.*, 1994; González-Casado *et al.*, 2000).

En la parte oriental de la ZFS, la Dorsal Oeste de Scotia es la responsable de la formación de la mayor parte de la corteza oceánica del Mar de Scotia desde el Oligoceno inferior hasta su extinción posterior al cron C3A (6,4 Ma), durante un período de compresión regional del Mar de Scotia, debido a un pequeño cambio en el polo de rotación (Livermore *et al.*, 2000; Maldonado *et al.*, 2000). Los segmentos de expansión de la Dorsal Oeste de Scotia están separados por antiguas fallas transformantes, entre las cuales las más orientales, las zonas de fractura Quest y Endurance, son particularmente prominentes (Figs. 2 y 3).

Aunque la expansión en las dorsales terminó hace 2,6 y 6,4 Ma, respectivamente, la fábrica oceánica de la llanura abisal está muy bien expuesta en parte como consecuencia del barrido continuo de los sedimentos por parte del flujo principal y profundo de la Corriente Circumpolar

Antártica (CCA). La continuidad de esta fábrica oceánica se ve interrumpida y aislada en áreas separadas entre zonas de fractura y salpicada por numerosos montes y volcanes submarinos, de los cuales más de 120 son fácilmente reconocibles y se distribuyen a ambos lados de la ZFS (Figs. 2 y 3).

Cartografiando el fondo marino del Paso de Drake: ecosonda multihaz

En las últimas tres décadas se ha adquirido un importante conjunto de datos geofísicos en el Paso de Drake, a partir de diversas campañas a bordo de buques oceanográficos con capacidad polar, entre los que se encuentra el BIO Hespérides. Estos datos incluyen perfiles de sismica de diferente resolución y capacidad de penetración, con los que se puede obtener una representación de las estructuras bajo el fondo del mar. Estos perfiles pueden ser de mucho detalle para los primeros 50 metros (muy alta resolución con perfilad -

res de fondo), para el relleno sedimentario que puede alcanzar varios kilómetros (perfiles de sismica de reflexión monocanal o multicanal) o incluso llegar hasta la discontinuidad de Mohorovičić, que separa la corteza del manto (sismica de refracción y de reflexión multicanal con grandes fuentes de energía). También se obtienen datos gravimétricos y magnéticos con los que determinar la distribución de densidad y susceptibilidad magnética, respectivamente, y que permiten discriminar la naturaleza de la corteza, la geometría de los cuerpos que producen desviaciones de los modelos teóricos (anomalías gravimétricas y magnéticas) y establecer la edad a partir de las alineaciones magnéticas en la corteza oceánica. Los métodos acústicos, ecosondas, permiten determinar la morfología y estructura más superficial del fondo marino de forma más extensiva y de estos destacaremos la ecosonda multihaz.

Los sistemas de ecosondas multihaz, normalmente situados en la

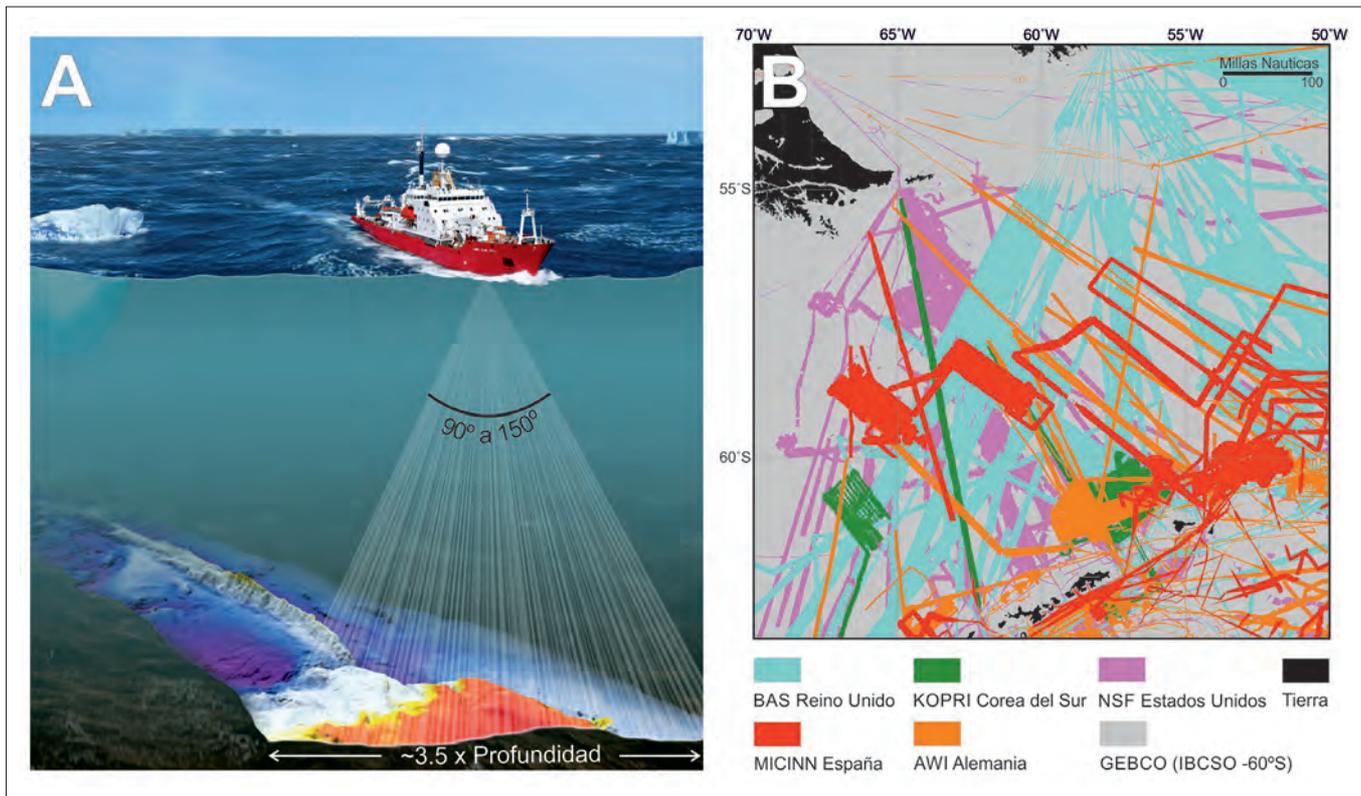


Fig. 4. A) Esquema conceptual de la adquisición de batimetría multihaz. La franja batimétrica de colores representa la Zona de Fractura Shackleton vista desde el sureste. B) Cobertura de batimetría multihaz adquirida por los diferentes países y utilizada para la realización del primer mapa batimétrico de alta resolución del Paso de Drake. Se recomienda consultar la versión digital.

quilla del barco, envían una serie de pulsos de sonido en forma de abanico, generalmente de 90° a 150°, y devuelve las profundidades desde la vertical y los laterales del barco (Fig. 4). Esto a veces se denomina banda

de batimetría, ya que produce una franja continua de información de profundidad, cuyo ancho es una función simple de la profundidad del agua y el ángulo de cobertura (generalmente 3,5 veces la profundidad). Como los

barcos que obtienen datos multihaz están constantemente en movimiento (balanceo, cabeceo y cambio de rumbo), esto debe medirse y aplicarse correcciones a los haces transmitidos.

Las más de 120 campañas realizadas entre 1992 y 2015 por los buques RRS James Clark Ross (Reino Unido), BIO Hespérides (España), RV Polarstern (Alemania), RV Nathaniel B. Palmer (Estados Unidos) y los RV Araon y Onnuri (Corea del Sur) con diferentes sistemas multihaz han permitido obtener una malla con una resolución de 200 × 200 m (algo así como cuatro campos de fútbol) con más de 83 millones de puntos de datos y permite cubrir aproximadamente el 65% de la superficie del Paso de Drake (Bohoyo *et al.*, 2019) (Fig. 4). Otros grandes proyectos como IBCSO han cartografiado todo el Océano Antártico por debajo de la latitud 60° S con una resolución de 500 m x 500 m (Arndt *et al.*, 2014).

La imagen batimétrica completa del Paso de Drake (Figs. 2 y 3) muestra claramente los principales

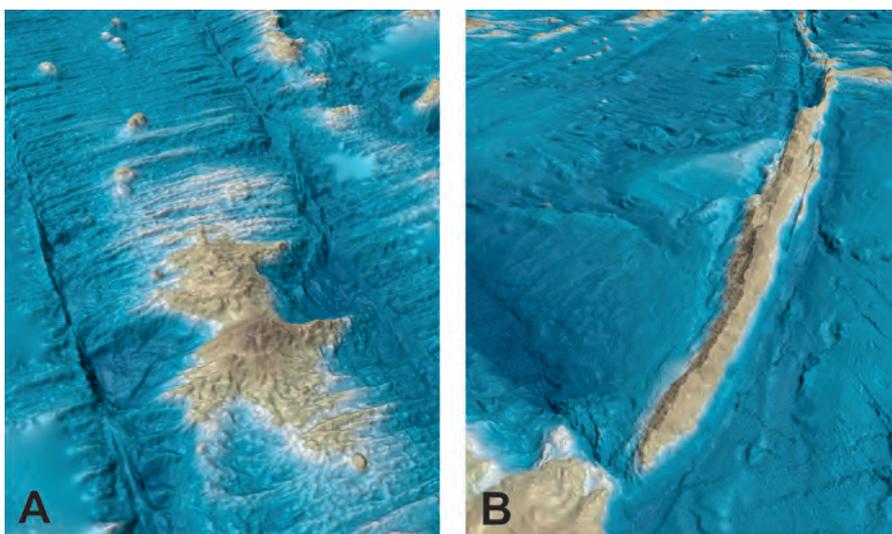


Fig. 5. A) Segmento intermedio de la dorsal de expansión oceánica Phoenix-Antártica, limitado a ambos lados por fallas transformantes de la corteza oceánica y dónde se puede observar la rugosidad de la fábrica oceánica interrumpida por volcanes submarinos. B) Zona de Fractura Shackleton vista desde el sureste donde destaca la altura que alcanza respecto al fondo marino circundante y la intersección con los relieves de la dorsales de expansión Oeste de Scotia (arriba a la derecha) y Phoenix-Antártica (arriba a la izquierda). Localización de las figuras y punto de vista indicados en la figura

rasgos tectónicos y morfológicos, como las intersecciones de las dorsales de expansión con la ZFS (Figs. 3 y 5) y las conexiones de esta con los márgenes continentales de la Tierra del Fuego (América del Sur) y el bloque y fosa de las Islas Shetland del Sur (sector noreste de la Península Antártica). También es posible diferenciar dos dominios principales: los márgenes continentales de América del Sur, Antártida y Shetland del Sur, incluidas las áreas de plataforma y talud, en colores cálidos (rojos, naranjas, amarillos) y el dominio oceánico, incluido el ascenso continental y la llanura abisal, en colores fríos (azules y púrpuras). Esta diferenciación en general se correlaciona con la corteza continental y las áreas de corteza oceánica, respectivamente, donde las isobatas (líneas de igual cota batimétrica) de -2000 metros marcan aproximadamente este límite (Fig. 3). Cada dominio contiene diferentes tipos de estructuras morfológicas que se han desarrollado mediante procesos tectónicos (fallas transformantes y transcurrentes, fosas oceánicas, dorsales de expansión y fábrica oceánica, volcanes submarinos, etc.) y sedimentarios (cañones submarinos, deslizamientos, depósitos sedimentarios relacionados con las corrientes de fondo o la actividad glacial) (Figs. 3 y 5).

Consideraciones finale

La formación del Paso de Drake constituye un magnífico ejemplo de la influencia de la Tectónica de Placas en el clima de nuestro planeta. La continua separación de la Península Antártica de América del Sur, por la expansión oceánica de las dorsales Phoenix-Antártica y Oeste de Scotia, permitió la instauración y circulación de la Corriente Circumpolar Antártica, responsable, entre otros, del aislamiento climático de la Antártida y ha contribuido a los episodios de enfriamiento global en el límite Eoceno-Oligoceno y durante el Mioceno superior. La Antártida, la porción de tierra más inhóspita del planeta, debe sus récords de ser el lugar más frío, seco y ventoso a una historia tectónica que arranca hace más de 50 millones de años. ●

BIBLIOGRAFÍA

- Aldaya, F. y Maldonado, A. (1996). Tectonics of the triple junction at the southern end of the Shackleton Fracture Zone (Antarctic Peninsula). *Geo-Marine Letters*, 16, 279-286.
- Arndt, J.E., Schenke, H.W., Jakobsson, M., Nitsche, F.O., Buys, G., Goleby, B., Rebeco, M., Bohoyo, F., Hong, J., Black, J., Greku, R., Udintsev, G., Barrios, F., Reynoso-Peralta, W., Taisei, M. y Wigley, R. (2013). The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO) Version 1.0. A new bathymetric compilation covering circum-Antarctic waters. *Geophysical Research Letters*, 40, 3111-3117.
- Barker, P.F. (2001). Scotia Sea regional tectonic evolution: implications for mantle flow and palaeocirculation. *Earth-Science Reviews*, 55, 1-39.
- BAS. (1985). *Tectonic Map of the Scotia Arc*. E. 1:3 000 000. BAS (Misc.) 3. British Antarctic Survey, Cambridge
- Bohoyo, F., Galindo-Zaldívar, J., Jabaloy, A., Maldonado, A., Rodríguez-Fernández, J., Schreider, A. y Suriñach, E. (2007). Extensional deformation and development of deep basins associated with the sinistral transcurrent fault zone of the Scotia-Antarctic plate boundary. En: *Tectonics of Strike-Slip Restraining and Releasing Bends* (Eds.: W. D. Cunningham y P. Mann), 203-217. Geological Society of London, Special Publication, London. doi:10.1144/sp290.6.
- Bohoyo, F., Larter, R.D., Galindo-Zaldívar, J., Leat, P.T., Maldonado, A., Tate, A.J., Flexas, M.M., Gowland, E.J.M., Arndt, J.E., Dorschel, B., Kim, Y.D., Hong, J. K., López-Martínez, J., Maestro, A., Bermúdez, O., Nitsche, F.O., Livermore, R.A. y Riley, T.R. (2019) Morphological and geological features of Drake Passage, Antarctica, from a new digital bathymetric model. *Journal of Maps*, 15 (2), 49-59, DOI: 10.1080/17445647.2018.1543618
- Cande, S.C. y Kent, D.V. (1995). Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 100 (B4), 6093-6095.
- Eagles, G. y Jokat, W. (2014). Tectonic reconstructions for paleobathymetry in Drake Passage. *Tectonophysics*, 611, 28-50.
- Galindo-Zaldívar, J., Jabaloy, A., Maldonado, A. y Sanz de Galdeano, C. (1996). Continental fragmentation along the South Scotia Ridge transcurrent plate boundary (NE Antarctic Peninsula). *Tectonophysics*, 242, 275-301.
- González-Casado, J.M., Giner-Robles, J.L. y López-Martínez, J. (2000). Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: not a normal back-arc basin. *Geology*, 28, 1043-1046.
- Larter, R.D. y Barker, P.F. (1991). Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: forces on a young subducting plate. *Journal of Geophysical Research*, 96 (B12), 19586-19607.
- Livermore, R.A., Balanyá, J.C., Maldonado, A., Martínez, J.M., Rodríguez-Fernández, J., Sanz de Galdeano, C., Galindo Zaldívar, J., Jabaloy, A., Barnolas, A., Somoza, L., Hernández-Molina, J., Suriñach, E. y Viseras, J. (2000). Autopsy on a dead spreading centre: the Phoenix Ridge, Drake Passage, Antarctica. *Geology*, 28, 607-610.
- Livermore, R., Eagles, G., Morris, P. y Maldonado, A. (2004). Shackleton Fracture Zone: no barrier to early circumpolar ocean circulation. *Geology*, 32 (9), 797-800.
- Livermore, R., Nankivell, A., Eagles, G. y Morris, P., (2005). Paleogene opening of Drake Passage. *Earth Planet. Sci. Lett.* 236 (1-2), 459-470.
- Maestro, A., López-Martínez, J., Galindo-Zaldívar, J., Bohoyo, F. y Mink, S. (2014). Evolution of the stress field in the southern Scotia Arc from the late Mesozoic to the present-day. *Global and Planetary Change*, 123 (B), 269-297.
- Maldonado, A., Balanyá, J.C., Barnolas, A., Galindo-Zaldívar, J., Hernández, J., Jabaloy, A., Livermore, R., Martínez-Martínez, J.M., Rodríguez-Fernández, J., De Galdeano, C.S., Somoza, L., Suriñach, E. y Viseras, C. (2000). Tectonics of an extinct ridge-transform intersection, Drake Passage (Antarctica). *Marine Geophysical Researches*, 21 (1-2), 43-67.
- Maldonado, A., Bohoyo, F., Galindo-Zaldívar, J., Hernández-Molina, F.J., Lobo, F.J., Lodolo, E., Martos, Y.M., Pérez, L.F., Schreider, A.A. y Somoza, L. (2014). A model of oceanic development by ridge jumping: Opening of the Scotia Sea. *Global and Planetary Change*, (123/B), 152-173.
- Thomas, C., Livermore, R. y Pollitz, F. (2003). Motion of the Scotia Sea plates. *Geophysical Journal International*, 155, 789-804.
- USGS ANSS Comprehensive Catalog (ComCat) <http://earthquake.usgs.gov/>