

GRADIENTE GEOTERMAL DE LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS DEL ECUADOR: COMPARACIÓN E IMPLICACIONES GEOLÓGICAS DEL ANTE-ARCO Y TRAS-ARCO

Diego Barba¹

1: Gerencia de Exploración. EP PETROECUADOR. diego.barba@epetroecuador.ec

Palabras clave: Cuenca ante-arco, cuenca tras-arco, margen activa, gradiente “frío”

ABSTRACT

The geothermal gradients in the fore-arc and back-arc of Ecuador were calculated through a lineal regression using BHT (bottom hole temperatures) measured at several depths and in different locations along the sedimentary basins. BHT was corrected by applying the AAPG empirical method and comparing it with BHT corrected by Horner method, DST and PVT data.

In order to compare the fore-arc and back-arc geothermal gradients, AAPG-corrected BHTs were used. The fore-arc geothermal gradient is 14.2 °C/Km, whereas that for the back-arc is 23.6 °C/Km. The low temperatures registered in the fore-arc can be related with its oceanic affinity basement accreted to the continent, little or no presence of the asthenospheric wedge and/or entry of fluid-bearing sediments into the subduction channel. This special condition defines the “cold” feature of the equatorial fore-arc. Geothermal gradient maps for each region were generated using uncorrected BHT data. In the back-arc region a confidence analysis was made, based in the amount of BHTs on different depths and the theoretical surface temperature. This analysis was not possible to do in the fore-arc, due to the scarce data available; nonetheless this map was created using a gradient calculated with at least three BHT at different depths.

Both maps show indirectly local differences in the configuration of the basins, related with variations in its sedimentary infill and the disposition and type of basement. Special characteristic is the low gradient observed near the Andes, related with the Macuchi arc in the fore-arc and the Subandean in the back-arc.

INTRODUCCIÓN

La energía termal de la corteza terrestre puede ser evidenciada por el análisis del gradiente geotermal, la conductividad termal y el flujo de calor. El presente trabajo busca comparar el gradiente geotermal calculado en el ante-arco respecto al observado en el tras-arco a nivel del Ecuador. Los datos utilizados corresponden a medidas de temperatura de fondo de pozo (BHT, por sus siglas en inglés). Los BHT son la principal fuente de información para el cálculo del gradiente geotermal, debido a que son un dato estándar adquirido durante el perfilaje de pozos petroleros (c.f. registros eléctricos con cable *wireline*) y por lo tanto ampliamente distribuidos en una cuenca sedimentaria.

Una discusión de diferentes tipos de datos de temperatura para el cálculo del gradiente puede ser revisado en Sigismondi & Ramos (2009) y Barba *et al.* (2021). Así como metodologías para calcular la temperatura de equilibrio a partir de datos de BHT en Deming (1989) y Barba *et al.* (2021).

El desarrollo de las montañas andinas y sus cuencas de ante-país relacionadas son el resultado de la convergencia entre la placa oceánica Nazca con la placa continental Sudamericana (Beltrán *et al.*, 2022). En Ecuador, la región del ante-arco ha sido levantada debido a la subducción de la cordillera de Carnegie, hasta encontrarse actualmente expuesta de manera subaérea (Carrillo *et al.*, 2022). Durante los últimos 2 Ma, la cuenca Golfo de Guayaquil-Tumbes ha sido caracterizada por un escape tectónico, posiblemente asociado con un fuerte acoplamiento a la subductante cordillera de Carnegie (Witt y Bourgois, 2010; Aizprua *et al.*, 2022).

En el ante-arco, los datos analizados cubren de manera general los altos estructurales de la cordillera Costera, la cordillera de Chongón-Colonche, cordillera de la Estancia y los diapiros arcillosos de Domito; así como los depocentros de Manabí, Progreso y Golfo de Guayaquil-Tumbes. La cuenca Golfo de Guayaquil-Tumbes está subyacente por un mayor límite litosférico entre Sudamérica continental y los terrenos acrecionados (Aizprua *et al.*, 2022). El relleno sedimentario del ante-arco está conformado por las mega-secuencias Paleógena y Neógena. En esta región se tiene mayor información en la parte Sur, lugar donde se encuentran la producción de hidrocarburos, con los campos de petróleo de Ancón - Pacoa y de gas en Amistad. La producción de hidrocarburos en el ante-arco fue importante hasta mediados del siglo XX, posterior a ello pasó a ser marginal.

En el tras-arco existe mayor cantidad de información asociado a la madurez exploratoria de la cuenca Oriente (c.f. UAB-Ecuador de Barba *et al.*, 2021). La mayoría de los BHT catalogados provienen de la parte Norte del tras-arco ecuatoriano, vinculada a la ocurrencia de campos petroleros, los mismos que fueron descubiertos a partir de finales de los años 60s. Los datos del tras-arco cubren el foredeep y el forebulge y la parte Norte del wedge-top (Levantamiento Napo). Sobre el basamento cristalino se tienen varios ciclos tectono-sedimentarios de edad Paleozoica, Triásico-Jurásica, Cretácica, Paleógena y Neógena. En el tras-arco se tiene la presencia de un magmatismo intra-placa que actuó durante el Cretácico (Barragán y Baby, 2014).

La variación del gradiente entre el ante-arco respecto al tras-arco puede estar relacionado con la cuña astenosférica, entrada de fluidos en la zonas de subducción y/o al tipo de basamento, ya que el basamento en el ante-arco está conformado mayormente por rocas de afinidad oceánica que han sido acrecionadas al margen Sudamericano.

Es común calcular el gradiente termal utilizando el BHT de la profundidad final del pozo (TD, por sus siglas en Inglés) y fijando una temperatura de superficie (e.g. Vaught, 1980). Esta forma de hacerlo es anticuada e imprecisa. Incluso calcular un gradiente a partir de varias medidas de BHT a diferentes profundidades y fijar una temperatura de superficie produce un valor sobreestimado (e.g. DUKE ENERGY INTERNACIONAL, 2000; Mathalone y Montoya, 1995).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que es común contar con abundante información tanto de BHT, como de DST y PVT a nivel de los reservorios, asociado a los pozos de desarrollo. Por lo que, el gradiente calculado puede resultar impreciso, siendo sobreestimado o subestimado por falta de control a niveles someros y profundos.

El gradiente geotermal está presentado en unidades del Sistema internacional [$^{\circ}\text{C}/\text{km}$]. Sin embargo, si se lo requiere en Unidades Imperiales [$^{\circ}/100\text{ ft}$], como es el estándar en algunos países, especialmente en la industria petrolera, se puede multiplicar por el factor de 0.0548.

METODOLOGIA

El gradiente geotermal muestra la variación de la temperatura en función de la profundidad. Es importante contar con información de BHT a diversas profundidades, con el objeto de obtener un gradiente termal adecuado. Información de niveles profundos proviene de pozos perforados en la zona del depocentro de la cuenca, mientras que información somera se la obtiene de pozos perforados en los bordes de la cuenca. Los pozos exploratorios de hidrocarburos son la principal fuente de información, ya que para alcanzar los yacimientos es necesario realizar la perforación de los hoyos en secciones, registrando la temperatura en cada una de ellas (BHT); a mayor número de secciones, mayor será el grado de confianza en la determinación del gradiente.

El siguiente paso es estructurar una base de datos de los BHT, teniendo en cuenta que pueden existir varios valores de BHT medidos a una misma profundidad, ante lo cual es importante registrar el tiempo en que fue realizada la medida de la temperatura a partir del momento en que finalizó la perforación del hoyo. Durante la perforación del hoyo, se utilizan fluidos de perforación que disturban la temperatura de la formación, por lo que es necesaria una corrección posterior para estimar la temperatura de equilibrio, para lo cual se puede recurrir al método de Horner o al método de la AAPG, en función del tipo de información disponible. Adicionalmente, la temperatura de equilibrio deberá ser comparada con datos de temperatura de fluidos producidos (e.g. DST y/o PVT) con el objeto de validar la información.

La temperatura del BHT es menor a la temperatura de la formación (Deming, 1989). Sin embargo, pueden dar una primera idea acerca del gradiente termal de la cuenca (Barba *et al.*, 2021) y muestra el posible tipo de correlación entre la temperatura y la profundidad.

En el presente trabajo se consideraron 130 registros correspondientes a 45 pozos en el ante-arco y 2402 registros asociados a 949 pozos en el tras-arco (Fig. 1). La notable diferencia en la cantidad de datos se debe a que los pozos del tras-arco están asociados a una cuenca madura y prolífica, mientras que en el ante-arco se tiene una cuenca madura pero con una baja tasa de descubrimientos.

El gradiente geotermal puede ser calculado a nivel de pozo, campo o zona (cluster), estos valores son utilizados en la construcción de los mapas, para poder observar variaciones, las mismas

que serán interpretadas de acuerdo a información geológica y geofísica disponible. Los gradientes geotermales fueron calculados a partir de regresión lineal. Se presenta la ecuación y su respectivo factor de correlación (Fig. 2) tanto para el tras-arco como para el ante-arco.

La base de datos fue depurada al eliminar los datos con profundidades menores a 305 m, para evitar efectos ambientales. También fueron eliminados los datos erróneos e incompletos, asociados a errores de registro, repetición, profundidad, entre otros (Figs. 1 y 2).

El trabajo consistió en vincular en gráficos (XPLOT) y en mapas comparativos los gradientes calculados a partir de los BHT provenientes del ante-arco (Barba, 2017) y del tras-arco (Barba *et al.*, 2021). La comparación sirvió de base para visualizar la influencia de la configuración cortical de una zona de convergencia. Los resultados obtenidos servirán de base para futuros trabajos sobre flujo de calor, así como parámetro de entrada en la modelización de sistemas petrolíferos.

Corrección por el método de la AAPG

Posterior al filtrado de la base original, se obtuvieron 128 registros correspondientes a 44 pozos en el ante-arco y 1069 registros de 897 pozos para el tras-arco (Fig. 2). A este nuevo set de datos, se administró la corrección empírica establecida por la AAPG, la cual está basada en función de la profundidad y que ha sido ampliamente utilizada por su fácil aplicabilidad (Kehle *et al.*, 1970; Vaught, 1980; Deming *et al.*, 1989; Sigismondi y Ramos, 2009; Alfaro *et al.*, 2009; Barba *et al.*, 2021).

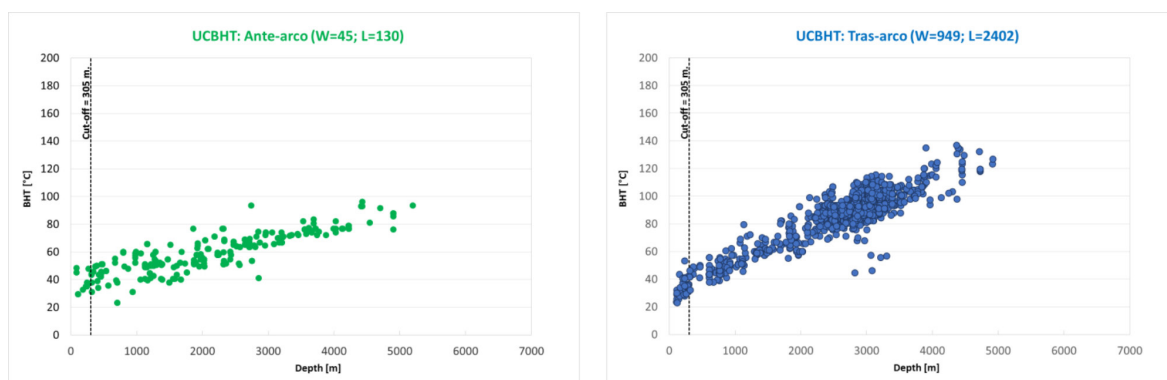


Figura 1. Datos de BHT disponibles para Ecuador. La base de datos no está filtrada y los BHT no están corregidos. Las letras W y L se refieren al número de pozos y los registros eléctricos recopilados.

Adicionalmente, el gradiente calculado a partir de los datos corregidos por el método de la AAPG servirá para comparar con trabajos previos, incluyendo los obtenidos en países vecinos como Colombia y Perú.

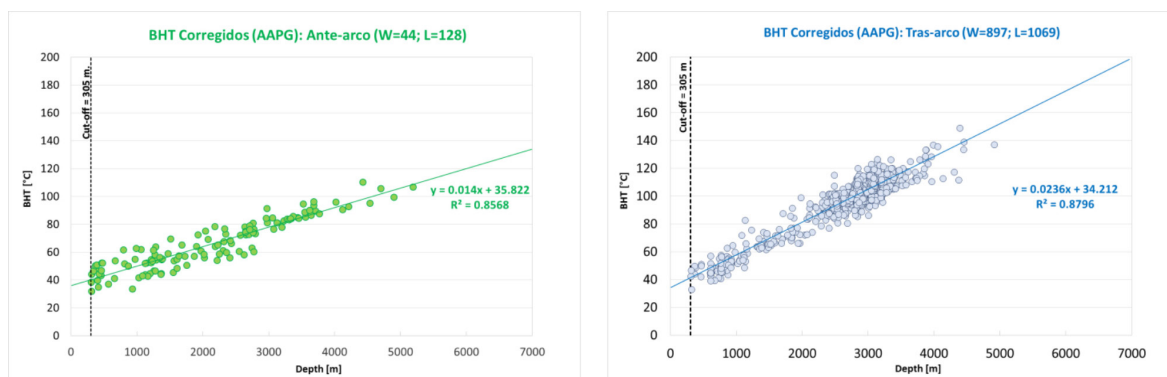


Figura 2. Datos de BHT corregidos por el método sugerido por la AAPG. Las letras W y L se refieren al número de pozos y los registros eléctricos recopilados.

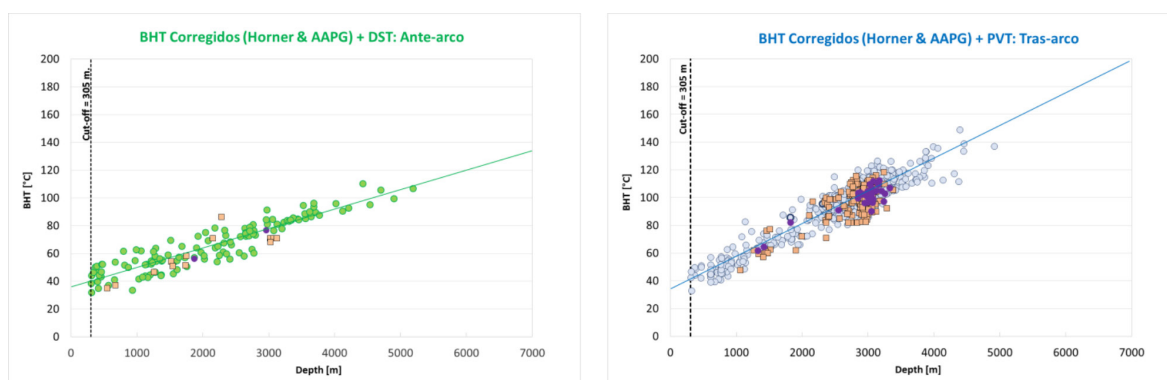


Figura 3. Comparación entre los datos corregidos por el método de la AAPG, BHT corregidos por el método de Horner (círculos morados), datos de DST para el ante-arco y PVT para el tras-arco (cuadrados naranjas).

Comparación con datos de BHT corregidos por Horner y con la temperatura de fluidos (DST y PVT)

La temperatura de la formación se encuentra perturbada por el fluido de perforación que es utilizado en la construcción del pozo. Para poder alcanzar nuevamente la temperatura original o de equilibrio es necesario que el hoyo se estabilice durante varias horas. Este tiempo de estabilización involucra al Tiempo de Circulación (CT, por sus siglas en Inglés) y el Tiempo desde la Circulación (TSC, por sus siglas en Ingles), lamentablemente esta información usualmente se pierde o es incorrectamente registrada.

El CT se lo puede extraer de los informes de perforación, mientras que el TSC se lo obtiene del encabezado de los registros eléctricos (header). La corrección por circulación de fluidos se basa en estos dos parámetros (Horner, 1951). En términos generales, tanto el CT y TSC se incrementan con la profundidad (Barba *et al.*, 2021). En el caso del ante-arco, la información para la corrección de Horner es escasa. Por el contrario, en el tras-arco del Ecuador si se pudo aplicar la corrección de Horner (Barba *et al.*, 2021).

Por otro lado, la temperatura reportada en los análisis PVT, se asume como uno de los datos más cercanos a la temperatura real de la formación. Sin embargo, estos datos se obtienen únicamente en los reservorios que producen hidrocarburos, por lo que su disponibilidad es discreta.

Datos de pruebas de producción (DST) están disponibles a nivel de los reservorios; aunque un problema frecuente es encontrar que la temperatura registrada corresponde a la del BHT y no a la registrada durante la prueba.

En el caso del tras-arco ecuatoriano, no se calculó un gradiente termal derivado de los datos BHT corregidos por el método de Horner, ni a partir de datos de PVT; debido a la falta de información a profundidades mayores a 3500 m. Barba *et al.* (2021) realizó el cálculo del gradiente geotermal a partir de datos corregidos por el método de Horner para toda la cuenca Alto Amazonas (UAB, por sus siglas en Inglés), siendo el valor obtenido de 23 °C/km.

Con el objeto de validar el gradiente geotermal calculado a partir de los datos de BHT corregidos por el método de la AAPG, se han sobrepuesto los BHT corregidos por el método de Horner y las temperaturas de las pruebas DST y PVT; notando que todas las series de datos se traslapan (Fig. 3).

Mapas de gradiente geotermal

El histograma bimodal de gradientes termales refleja que el tras-arco dispone de una mayor cantidad de información respecto al ante-arco. Al tener un carácter bimodal es recomendable analizar sus variaciones de manera independiente. El gradiente del ante-arco es la mitad del gradiente del tras-arco, de acuerdo a los parámetros estadísticos analizados (Fig. 4).

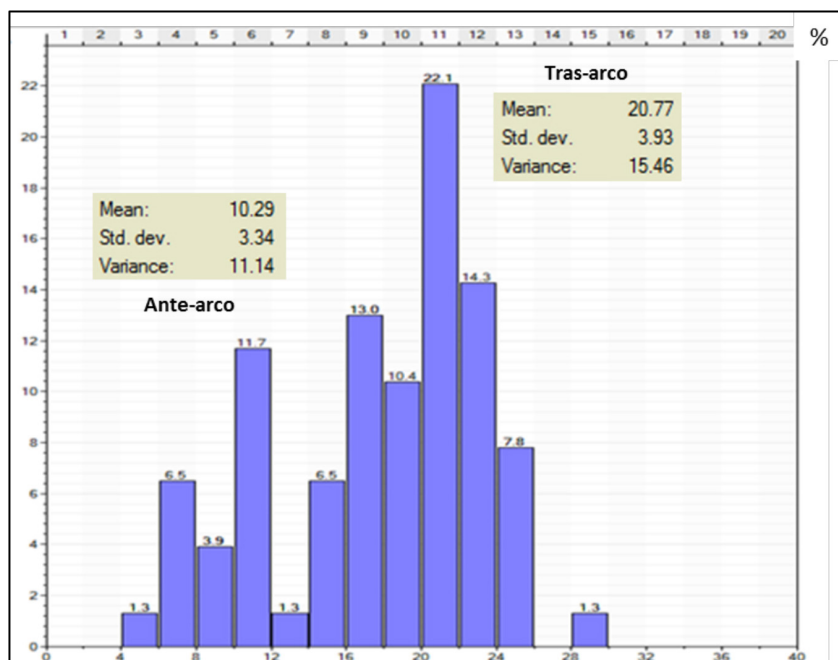


Figura 4. Histograma de gradientes termales calculados utilizando los datos de BHT no corregidos [°C/km]. El pico de la izquierda corresponde al ante-arco y el pico de la derecha corresponde al tras-arco ecuatoriano, lo que refleja que la información corresponde a dos entornos geológicos distintos.

Para la construcción de los mapas de gradiente termal se utilizaron los datos de BHT no corregidos, tanto para el ante-arco como para el tras-arco (Fig. 5).

En el caso de tras-arco los datos fueron tomados de Barba *et al.* (2021), en cuyo estudio se utilizó un análisis de certidumbre basado en el número de BHT disponibles a diferentes profundidades en cada pozo (mínimo tres BHT por ubicación) y su correspondiente temperatura superficial teórica.

Por otro lado, en el ante-arco se calcularon los gradientes a nivel de pozo, campo (c.f. Amistad -Gas-, Ancón -Petróleo- y Pacoa -Petróleo-) o un área (c.f. Ancón offshore -Plataforma Levantamiento de Santa Elena-). El mapa presentado en este trabajo fue construido utilizando los gradientes calculados a partir de locaciones que dispongan con al menos tres BHT a diferentes profundidades. En el trabajo de Barba (2017) se utilizaron al menos dos BHT por ubicación y no fueron incluidos los pozos B1-DOX1-1X (7.7 °C/Km) y B1-NSX1-1X (8.7 °C/Km) de la zona de Valdivia. El mapa presentado en esta ocasión, a más de incluir los pozos de Valdivia, toma en cuenta gradientes calculados con al menos tres BHT y adicionalmente considera tres pozos de la cuenca de Tumbes del Perú (gradiente entre 11.9 y 15.9 °C/Km) con el objeto de delinear de mejor manera las isolíneas en la zona fronteriza con el Perú.

Finalmente, la presentación de los dos mapas de gradiente geotermal se realizó bajo el mismo formato, con una malla de 500 x 500 m; isolíneas cada 1 °C/Km, método de interpolación de mínima curvatura y una paleta de colores que varía entre 0 y 40 °C/Km, donde los colores cálidos representan altos gradientes y los colores fríos corresponden a bajos gradientes (Fig. 5).

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Es claro que el gradiente termal del ante-arco es menor al gradiente del tras-arco (Fig. 4; 5 y 7). Esta variación se puede asociar en primer lugar al tipo de basamento involucrado. El basamento del ante-arco está formado por rocas de afinidad de piso oceánico acrecionadas al margen Sudamericano entre el Cretácico tardío y el Eoceno tardío (Jaillard *et al.*, 1995; Reynaud *et al.*, 1999; Kerr *et al.*, 2002; Hughes and Pilatasig, 2002). Mientras que el basamento del tras-arco está formado por rocas pre-Cámbricas asociadas al escudo Guayanés (Ruiz *et al.*, 2004; Font *et al.*, 2013; Díaz *et al.*, 2014). Por otro lado, también se puede asociar esta variación a la configuración de la cuña astenosférica, la cual está presente bajo el tras-arco, mientras que a la altura del ante-arco está casi ausente. Más aún, la raíz Andina, que alcanza una profundidad de aproximadamente 50 km (Ocola *et al.*, 1975; Jaillard *et al.*, 2005; Font *et al.*, 2013), juega un papel importante en la configuración termal de la cuña astenosférica, impidiendo que las isothermas se extiendan hacia el ante-arco. Por otro lado, la entrada de sedimentos portando agua en la zona de subducción (Calahorrano *et al.*, 2008) estaría también relacionada con los bajos gradientes termal observados en el ante-arco del Ecuador (Barba, 2017).

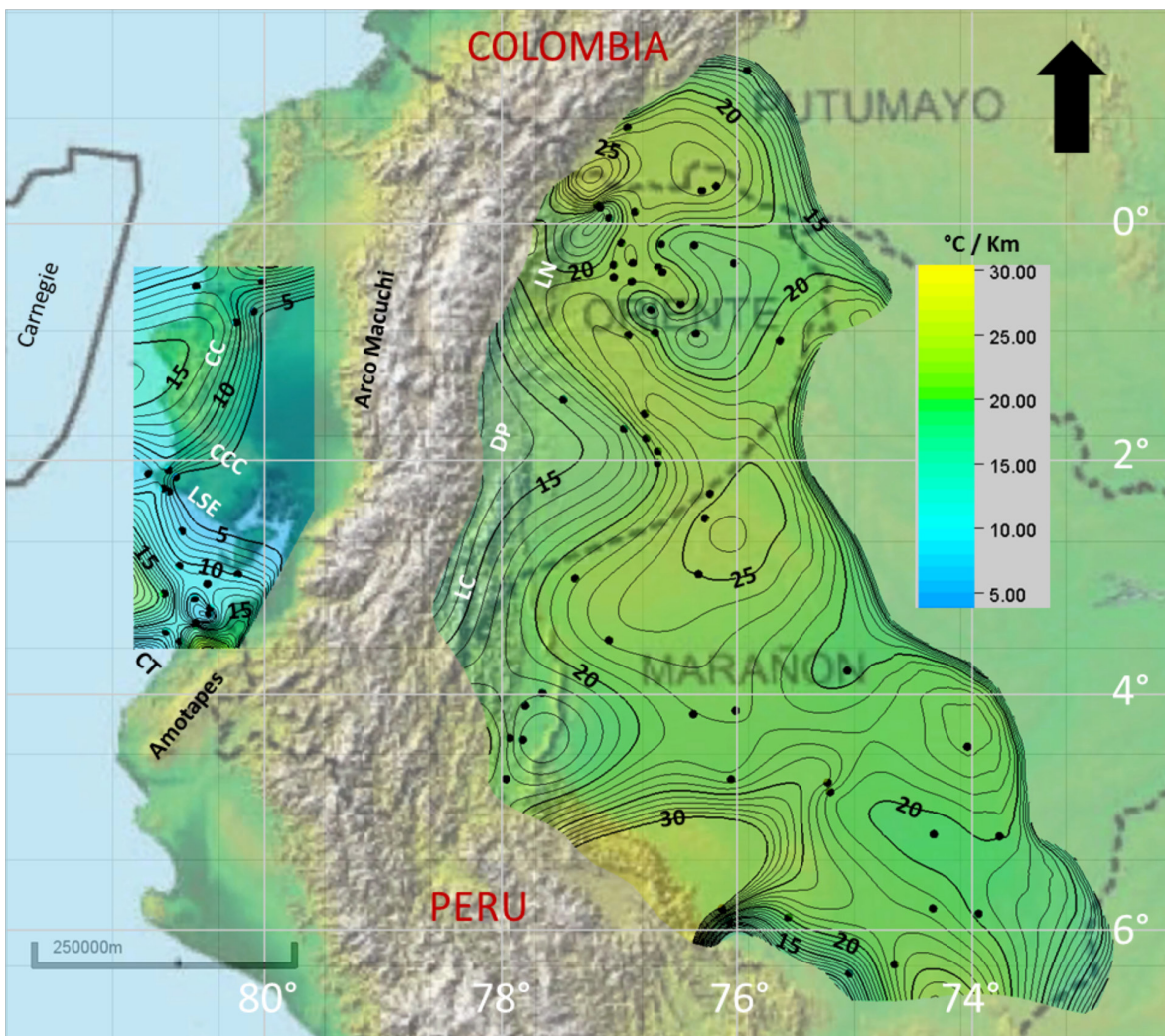


Figura 5. Mapas del gradiente geotermal calculados a partir de los datos de BHT no corregidos. Los puntos negros indican la localización de los gradientes individuales calculados, ante-arco de Barba (2017) y tras-arco de Barba *et al.* (2021). Mapa base tomado de Baby *et al.* (2014). LSE = Levantamiento de Santa Elena; CC = cordillera Costera; CCC = Cordillera Chongón Colonche; CT=Cuenca Tumbes; LC = Levantamiento Cutucú; DP = Depresión Pastaza; LN = Levantamiento Napo.

En términos generales, se puede observar que tanto en el tras-arco como en el ante-arco presentan zonas de bajo gradiente en las estribaciones de la cordillera de los Andes. Esto podemos asociarlo a la pérdida de cobertura sedimentaria relacionada a la erosión producto del Levantamiento Subandino en el tras-arco (Baby *et al.*, 2014); mientras que en el ante-arco estaría asociado con la presencia del arco Macuchi.

Para discutir las variaciones del gradiente geotermal en cada una de las zonas analizadas (Fig. 6), se ha utilizado el mapa de anomalías de gravedad (*free air anomaly*) de acuerdo a Bonvalot *et al.* (2012). Una discusión detallada de la cuenca Alto Amazonas (UAE, por sus siglas en Inglés) se encuentra en Barba *et al.* (2021); siendo en Ecuador, la anomalía de Cononaco, de tendencia NW-SE, la más importante. Esta anomalía transversal al rumbo andino estaría asociada al arco

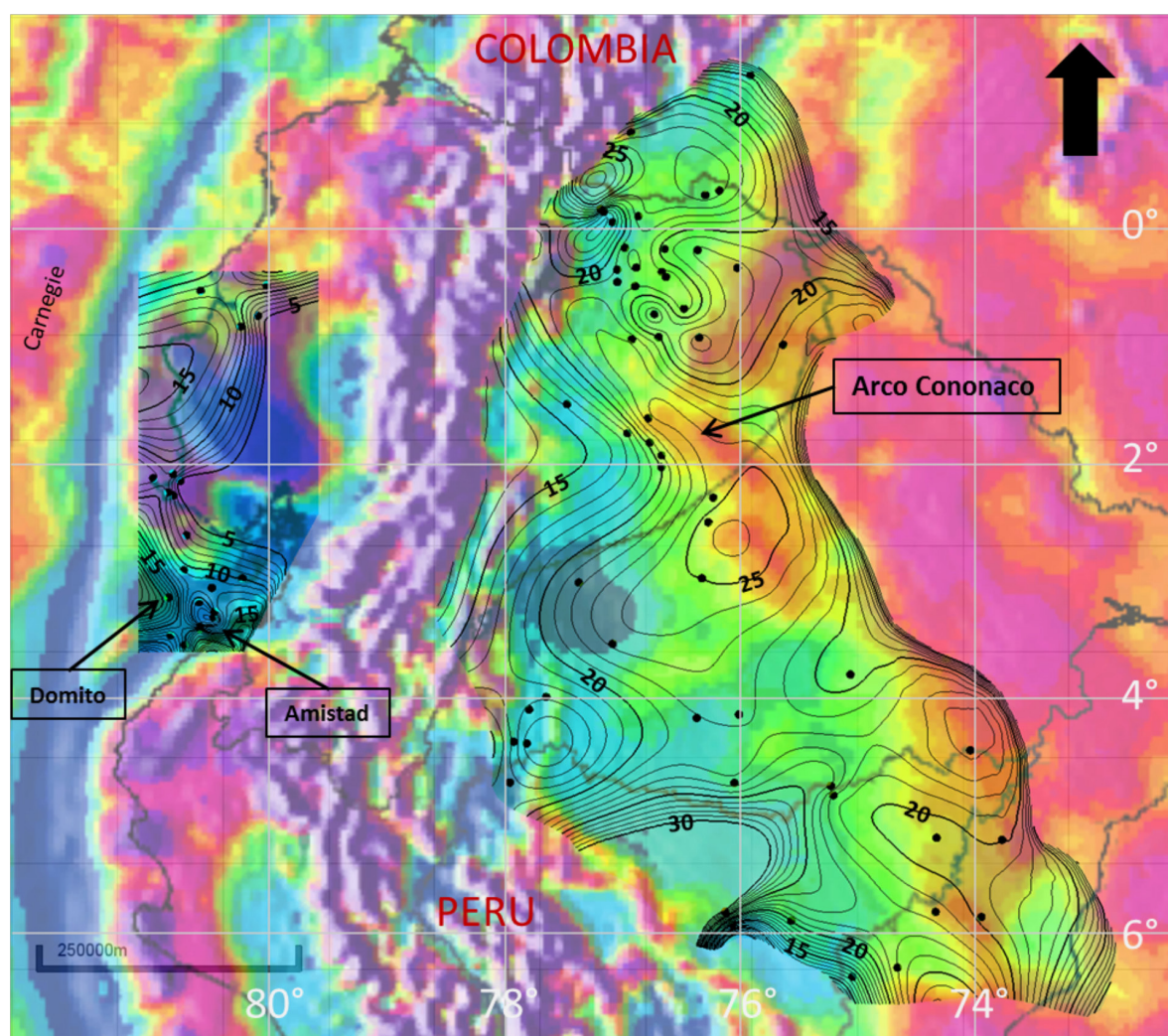


Figura 6. Mapas del gradiente geotermal calculados a partir de los datos de BHT no corregidos. Mapa base corresponde a la anomalía gravimétrica de aire libre de Bonvalot *et al.* (2012).

Cononaco de White *et al.* (1995), así como también coincide con la mayor acumulación de rocas ígneas emplazadas en el Cretácico tardío (Barragán y Baby, 2014).

Respecto al ante-arco, se nota un mayor gradiente hacia la parte Noroeste del mapa generado, el cual puede estar vinculado a la presencia de la cordillera de Carnegie, la cual es la extensión hacia el Oeste del punto caliente de Galápagos (Fig. 5). Por otro lado, los bajos gradientes observados en la parte central del mapa están asociados al Levantamiento de Santa Elena (Fig. 5), donde se tiene ausencia de cobertura sedimentaria Neógena y exposición de rocas Cretácico-Paleógenas, incluyendo rocas de basamento Piñón. Al tener esto en cuenta, se puede interpretar que los bajos gradientes reportados en el campo Amistad, pueden estar vinculados a un alto de basamento de afinidad oceánica (Barba, 2017). Los mayores gradientes termale observados al Sureste del mapa están asociados al basamento continental (Amotapes) y al depocentro de la cuenca de Tumbes.

Finalmente el mayor gradiente fue registrado en el área de Domito, que de acuerdo a Barba (2017), corresponde a un evento aislado relacionado con la presencia de diapiros arcillosos aislados.

El gradiente geotermal calculado en trabajos anteriores para el Golfo de Guayaquil fue de 18.3 °C/km (LITTON RESOURCE GROUP, 1986); 20.1°C/Km (AMOCO and PETROECUADOR, 1993; DUKE ENERGY, 2000; Aguilar *et al.*, 2009), y 23.2 °C/Km (PDVSA, comunicación personal). Ninguno de estos valores concuerda con el reportado en este trabajo, debido a que fueron calculados utilizando una temperatura de superficie fija y a partir de datos de BHT no corregidos (Barba, 2017).

En el tras-arco ecuatoriano, trabajos previos han calculado un gradiente de 21.4 °C/km (Hamza *et al.*, 2005) a partir de datos de BHT corregidos; mientras que Burgos *et al.* (2004) y Christophoul *et al.* (2014) calcularon un gradiente de 22 °C/km, utilizando datos de BHT no corregidos. Ambos valores son similares al calculado en el presente estudio.

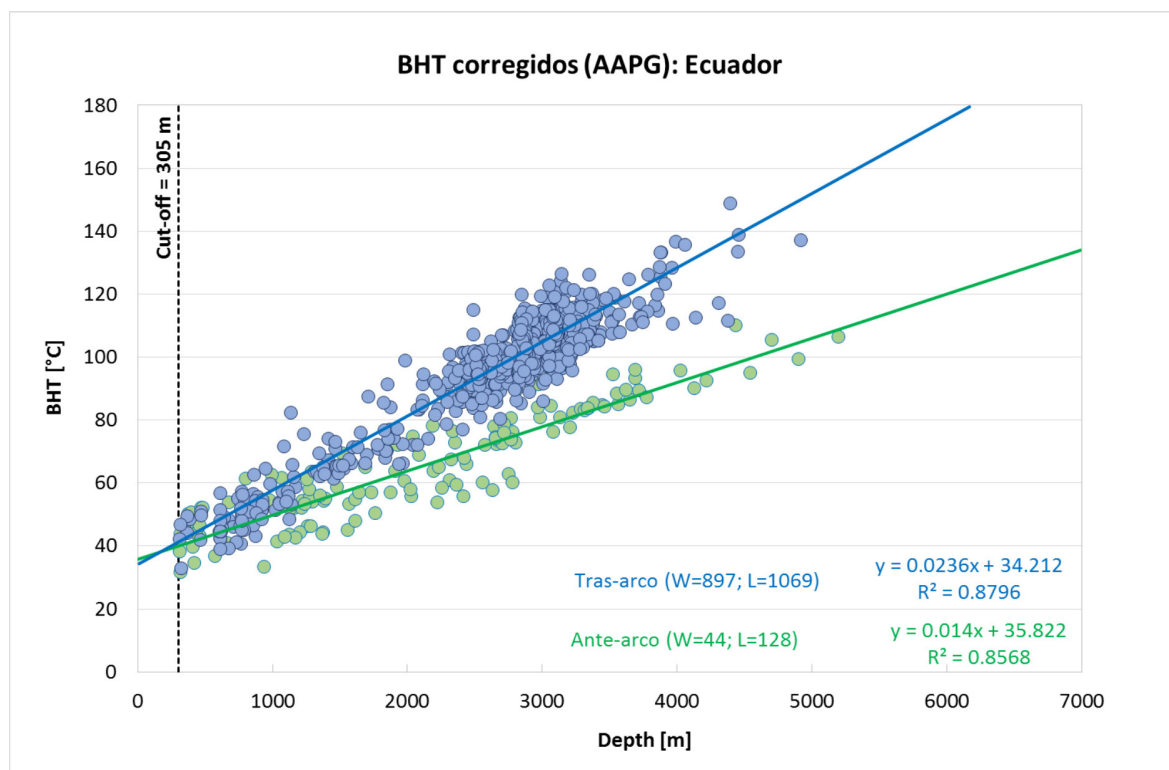


Figura 7. Comparación entre el gradiente geotermal calculado para el tras-arco y ante-arco, utilizando los datos de BHT corregidos por el método propuesto por la AAPG (e.g. Kehle *et al.*, 1970). Las letras W y L se refieren al número de pozos y los registros eléctricos recopilados y validados.

El gradiente geotermal calculado para el ante-arco es 0.6 veces menor al gradiente del tras-arco. Los gradientes determinados en ambos casos presentan un buen coeficiente de correlación (Fig. 7). Las menores temperaturas registradas en el ante-arco impactan en el potencial generador de hidrocarburos, restringiendo la existencia de cocinas activas a la parte más profunda de la cuenca.

CONCLUSIONES

Un cálculo adecuado del gradiente geotermal debe considerar varias medidas de temperatura a diferentes profundidades, por lo cual debe ser prioridad adquirir datos de temperatura en cada una de las secciones empleadas en la construcción de un pozo, especialmente de los de carácter exploratorio. Datos adquiridos en los bordes y en el depocentro de la cuenca permiten definir correctamente la pendiente de la curva, evitando sobre- y sub-estimar el gradiente.

Los BHT corregidos por el método empírico de la AAPG muestran una buena correlación con BHT corregidos por el método de Horner, datos de DST y PVT; siendo estos últimos considerados los de mayor aproximación a la temperatura de equilibrio. Lamentablemente, no fue posible contar con datos suficientes en el ante-arco, tampoco con datos a profundidades mayores a 3500 m en el tras-arco; que permitan calcular un gradiente confiable derivado de estos datos.

El gradiente geotermal calculado a partir de datos de BHT corregidos por el método de la AAPG para el ante-arco es de 14.0 °C/km; mientras que el gradiente geotermal calculado para el tras-arco es de 23.6 °C/km. En ambos casos, la temperatura teórica de superficie está alrededor de los 35 °C.

El gradiente del ante-arco es 0.5 a 0.6 veces menor que el gradiente del tras-arco. Las menores temperaturas observadas en el set de datos del ante-arco puede estar asociada con: 1) presencia de un basamento de afinidad de piso oceánico en el ante-arco; 2) presencia limitada de la cuña astenosférica bajo el ante-arco y 3) entrada de sedimentos portando fluidos en el canal de subducción. La excepción serían los gradientes moderados (respecto a los del Golfo de Guayaquil – Levantamiento de Santa Elena) registrados en la cuenca de Manabí – Caráquez, que estarían relacionados a la subducción de la cordillera de Carnegie.

AGRADECIMIENTOS

Los datos presentados en este trabajo han sido recopilados de la base de datos del Archivo Técnico de EP PETROECUADOR, la que incluye registros eléctricos e informes inéditos elaborados por compañías privadas que han operado en el Ecuador; por lo que debemos agradecer a la Gerencia de Exploración y Producción por permitir la difusión de los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- | | |
|---|---|
| Aguilar R., Alemán A., Ordóñez M., Montenegro G., Noya J., Ortega R. 2009. Evolución Tectonoestratigráfica y Sistema Petrolífero de la Cuenca Progreso en Ecuador y Perú. Resumen extendido para el X Simposio Bolivariano, Cartagena de Indias, Colombia, p. 12. | Aizprua C., Witt C., Barba D. 2022. An appraisal of basin development at the trailing edge of the Northern Andes, SW Ecuador-NW Peru. In Zamora G. and Mora A. eds., Andean Structural Styles: A seismic Atlas, Section IV, Chapter 18, p. 237-247. |
|---|---|

- Alfaro C., Alvarado I., Quintero W., Vargas C., Briceño L. 2009. Mapa Preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia, In: INGEOMINAS, ANH (Eds.), Proyecto Mapa Geotérmico de Colombia, p. 34.
- AMOCO & PETROECUADOR. 1993. Coastal Ecuador Technical Evaluation Agreement. Unpublished report, Vol. 1, p. 218.
- Baby P., Rivadeneira M., Barragán R. (2014) Introducción. En Baby P., Rivadeneira M., Barragán R. eds., La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo, Tercera edición, Travaux de l'Institut Français d'Études Andines, 144, p. 17-26.
- Barba, D. 2017. Gradiente Geotermal de las Cuencas de ante-arco del Ecuador. Resúmenes extendidos de las VIII Jornadas en Ciencias de la Tierra, EPN, Quito, Ecuador, 5 p.
- Barba D. Barragan R., Gallardo J., Ormasa A., Salgueiro A. 2021. Geothermal Gradients in the Upper Amazon Basin derived from BHT data. IJTHFA, Vol. 4, No. 1, p. 85-94
- Barragan R. Baby P. 2014. Magmatismo alcalino intraplaca en la Cuenca cretácica Oriente, Ecuador: Evidencias geoquímicas, geocronológicas y Tectónicas. En Baby P., Rivadeneira M., Barragán R. eds., La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo, Tercera edición, Travaux de l'Institut Français d'Études Andines, 144, p. 81-102.
- Beltrán W., Espitia W., Bello-Palacios D., Arias J., Higuera C. 2022. Structural styles of the southern Putumayo Foreland Basin, northern Andes, Colombia. In Zamora G. and Mora A. eds., Andean Structural Styles: A seismic Atlas, Section III, Chapter 17, p. 227-234.
- Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A.M., Kuhn, Peyrefitte, A., Vales, N., Biancale, R., Gabalda, G., Reinquin, F., Sarrailh, M. 2012. World Gravity Map. Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris. <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Land-Gravity-data>.
- Burgos J., Baby P., Chistophoul F., Soula J.-C., Rocaht P. 2004. Cuantificación de las Erosiones Terciaria y Plio-Cuaternaria de la parte Sur de la cuenca Oriente. En Baby P., Rivadeneira M., Barragán R., eds, La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo, Primera edición, Travaux de l'Institut Français d'Études Andines, tomo 144, p. 115-130.
- Calahorrano A., Sallarès V., Collot J.-Y., Sage F., Ranero C. 2008. Nonlinear variations of the physical properties along the southern Ecuador subduction channel: Results from depth-migrated seismic data. Earth and Planetary Science Letters, 267, p. 453-467.
- Carrillo E., Barragán R., Vázquez-Taset Y., Almeida R., Chalmonte A., Martín G. 2022. The Manabí and Esmeraldas-Borbón forearc basins of Ecuador. In Zamora G. and Mora A. eds., Andean Structural Styles: A seismic Atlas, Section IV, Chapter 19, p. 249-262.
- Christophoul F., Burgos J., Baby P., Soula J.-C., Bès de Berc S., Dávila C., Rivadeneira M. 2014. Dinámica de la Cuenca de Ante-País Oriente desde el Paleógeno: Relaciones Tectónica-Erosión-Sedimentación. En Baby P., Rivadeneira M., Barragán R. eds., La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo, Tercera edición, Travaux de l'Institut Français d'Études Andines, tomo 144, p. 105-131.
- Deming D. 1989. Application of bottom-hole temperature corrections in geothermal studies. Geothermics, 18, p. 775-786.
- Díaz M., Baby P., Rivadeneira M., Christophoul F. 2014. El pre-Aptense en la Cuenca Oriente Ecuatoriana. En Baby P., Rivadeneira M., Barragán R. eds., La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo, Tercera edición, Travaux de l'Institut Français d'Études Andines, 144, p. 31-52.

- DUKE ENERGY INTERNATIONAL. 2000. Geological and Geophysical evaluation of Progreso Basin, Southwestern Ecuador. Unpublished report, p. 230.
- Font Y., Segovia M., Vaca S., Theunissen T. 2013. Seismicity patterns along the Ecuadorian subduction zone: new constraints from earthquake location in a 3-D a priori velocity model. *Geophysical Journal International*, Vol. 193, Issue 1, p. 263-286
- Hamza V., Silva F., Gomes A., Delgadillo Z. 2005. Numerical and functional representation of regional heat flow in South America. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 152, p. 223-256.
- Horner, D. 1951. Pressure buildup in wells. In: *Proc. 3rd World Petroleum Congress, Section II*, p. 503-521.
- Hughes R. and Pilatasig L. 2002. Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, vol. 345, no. 1-4, p. 29-48.
- Jaillard E., Ordoñez M., Benítez S., Berrones G., Jiménez N., Montenegro G., Zambrano I. 1995. Basin development in an accretionary, oceanic-floored fore-arc setting: southern coastal Ecuador during late Cretaceous-late Eocene time. In Tankard A., Suárez R., Welsink H. eds., *Petroleum Basins of South America*, AAPG Memoir, vol. 62, p. 615-631.
- Jaillard E., Guillier B., Bonnardot M.-A., Hassani R., Lapierre H., Toro J. 2005. Orogenic build of the Ecuadorian Andes. Extended Abstract, 6th ISAG, Barcelona, Spain, p. 404-407.
- Kehle, R., Schoepel R., Deford, R. 1970. The AAPG Geothermal Survey of North America, Geothermics, Special Issue 2, U.N Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa 1970, Vol. 2, Part 1, p. 358-367.
- Kerr A., Aspden J., Tarney J., Pilatasig L. 2002. The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador: geochemical and tectonic constraints. *Journal of the Geological Society*, vol. 159, no. 5, p. 577-594.
- LITTON RESOURCE GROUP. 1986. The Gulf of Guayaquil Basin Study: Geochemistry. Unpublished report for CEPE. Vol. I, p. 172.
- Mathalone, J.M.P., Montoya, R. 1995. Petroleum geology of the sub Andean basins of Peru. In Tankard, A.J., Suarez S., R., Welsink, H.J. eds. *Petroleum Basins of South America*, 62. AAPG Memoir, p. 423-444.
- Ocola, L., Aldrich, L.T., Gettrust, J.F., Meyer, R.P. & Ramirez, J., 1975. Project Nariño; I, Crustal structure under southern Colombian-northern Ecuador Andes from seismic refraction data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65(6), p. 1681-1695.
- Reynaud C., Jaillard E., Lapierre H., Mamberti M., Mascle G. 1999. Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: their place in the geodynamic evolution of northwestern South America. *Tectonophysics*, vol. 307, no. 3-4, p. 235-254.
- Ruiz G., Seward D., Winkler W. 2004. Detrital thermochronology – a new perspective on hinterland tectonics, an example from the Andean Amazon Basin, Ecuador. *Basin Research*, 16, p. 413-430.
- Sigismondi, M., Ramos, V. 2009. El flujo de calor en la cuenca Neuquina: Parte 1. *Petrotecnia*, 1, p. 64-81.
- Vaught T. 1980. Temperature gradients in a portion of Michigan: A review of the usefulness of data from the AAPG geothermal survey of North America. National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, p. 44.

- White H., Skopec R., Ramírez F., Rodas J., Bonilla G. 1995. Reservoir characteristics of the Hollín and Napo formations, western Oriente basin, Ecuador. In Tankard A., Suarez S., Welsink H. eds., *Petroleum basins of South America*, AAPG Memoir 62, p. 573-596.
- Witt C., Bourgois J. 2010. Forearc basin formation in the tectonic wake of a collision-driven, coast-wise migrating crustal block: the example of the North Andean block and the extensional Gulf of Guayaquil-Tumbes Basin (Ecuador-Peru border area). *Geol. Soc. Am. Bull.* 122 (1-2), p. 89-108.