

# Análisis térmico de la Cuenca Oriental de Venezuela a partir de información de pozos

Daryineth A. Fernández(\*), María I. Jácome, Carlos E. Izarra. Universidad Simón Bolívar, Venezuela.  
Carolina Olivares. PDVSA

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

## Abstract

The Guárico Sub-basin, located within the Eastern Venezuelan Basin, forms an important region for oil exploitation, with an important number of oil producing wells and significant gas reserves. The geochemical well data and bore hole temperature values clearly shows an anomalous thermic behaviour in the northern region of the Guárico Sub-basin, represented by a high heat flow zone. The well selection and the quality control of their temperature data, allowed the elaboration of a series of thermal sections across the northern zone of the Sub-basin where the data is concentrated. With these profiles it is possible to identify high temperature characteristics in the thick layer of the Miocene sediments and elaborate a series of heat flow maps corresponding to different geologic times. With these maps, a high heat flow has been recognized in the northern region of the Eastern Basin, with values between 60 and 75 mW/m<sup>2</sup>. The high temperature gradients to the north of the Guárico Sub-basin and in the proximities of the Maturín Sub-basin are associated to Miocene sediments located between 2000 and 3500 meters depth. This high temperature gradient may be caused locally by the adiabatic compression of gases due to the compressive process associated with the Guárico Deformation Front. The regional cause of the high heat flow values in north-western Venezuela may be related to the subduction of the Caribbean Plate under the South American Plate. Under subduction melted material forms an asthenospheric wedge that erodes thermally the base of the Southamerican lithosphere producing a temperature high in the northwest and northcentral areas of Venezuela.

## Introducción

Información geoquímica de muestras de pozos en la Cuenca Oriental de Venezuela (Figura 1), conformada por Subcuenca de Guárico y Subcuenca de Maturín, ha evidenciado la existencia de una zona anómala de alta temperatura. Este trabajo busca la creación de una base de datos calibrada, a partir del análisis de la información de pozos, que permita entender la situación geodinámica y térmica de la cuenca y su influencia en la madurez termal de las rocas madres y los hidrocarburos generados en ellas.

Hamza y Muñoz (1996) generaron un mapa que muestra la respuesta de flujo de calor de Sur América. Los altos valores de flujo de calor están asociados a las cadenas

montañosas volcánicas y los valores menores están referidos a las áreas de los escudos estables. El mapa también muestra un aumento del flujo de calor en el margen norte de Sur América, al norte de Venezuela, donde a primera vista no se puede atribuir este fenómeno a ningún proceso que genere tal pérdida de calor superficial.

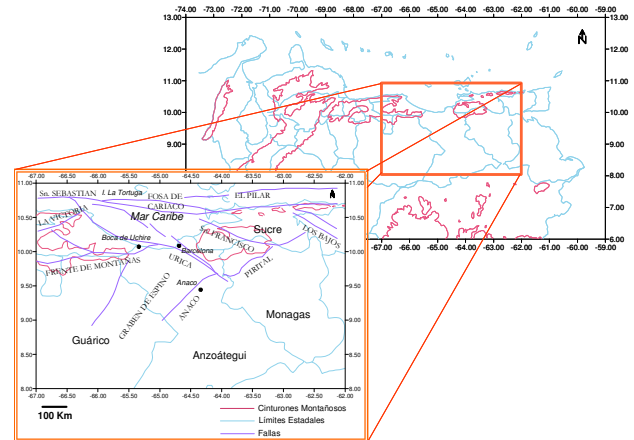


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Para analizar esta situación, se dispone de información de BHT (Bore Hole Temperature) a diferentes profundidades y de las profundidades asociadas a cada tope estratigráfico para 57 pozos en el área, que van de 2085 pies a 20285 pies de profundidad con temperaturas entre 280°K (6.85°C) y 480°K (206.85°C). Además se dispone de información sísmica de 7 transectos distribuidos en la cuenca (Figura 2).

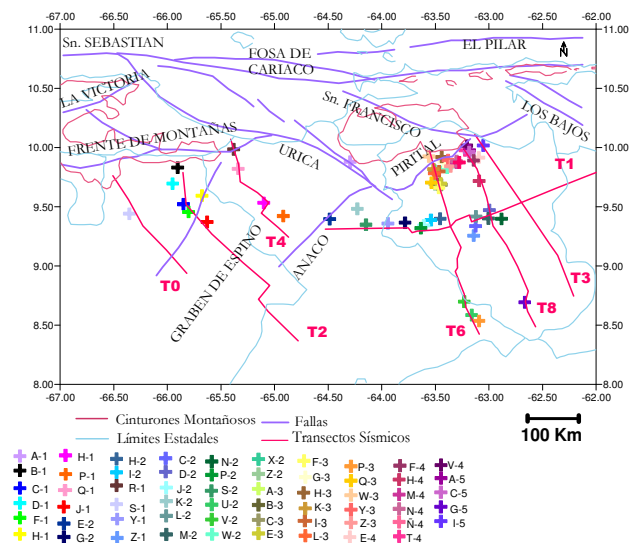


Figura 2. Ubicación de pozos y transectos sísmicos

La densidad de información sin analizar permitió el establecimiento de 4 perfiles para estudiar y asociar los comportamientos termales, estratigráficos y tectónicos (Figura 3).

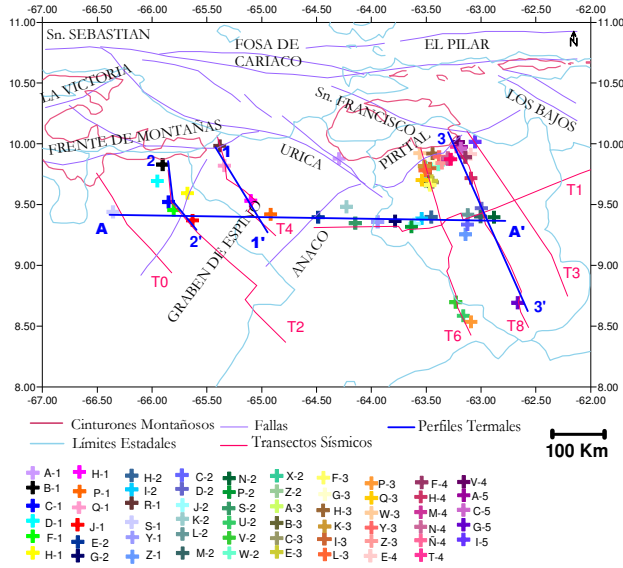


Figura 3. Ubicación de perfiles

### Integración de datos Estratigráficos, Tectónicos y Térmicos

Proyectando los pozos más cercanos a cada perfil y utilizando los valores de BHT correspondientes, se genera para cada uno una sección que muestra la variación de la temperatura con la profundidad y con la distancia horizontal en la dirección del perfil.

**Sección 1-1':** De 135 km de largo, entre el Corrimiento de Anaco y el Frente de Deformación de Guárico (Figura 3). Muestra enfriamiento gradual de la temperatura para profundidades cada vez menores, desde una máxima de 420°K (146.85 °C) a 4000 metros de profundidad hasta una temperatura superficial de 280°K (6.85°C) (Figura 4.1).

**Sección 2-2':** De 66 km de largo, con el Frente de Deformación de Guárico hacia su porción más norte (Figura 3). Aunque el comportamiento de la temperatura esperado para condiciones normales, al noroeste de la sección se muestra un aumento de la temperatura a aproximadamente 420°K (146.85 °C) a 2000 metros de profundidad rodeada por un sector de temperatura considerablemente menor (Figura 4.2).

**Sección 3-3':** De 295 Km. de largo, va desde la Falla de San Francisco al norte, atravesando pocos kilómetros después el Corrimiento de Piritá (Figura 3). La temperatura disminuye hacia la superficie, con cambios laterales. Así, el extremo inferior de la sección al noroeste presenta altas temperaturas relacionadas al sistema de fallas ubicadas al norte del estado Monagas y en dirección sureste, tanto en profundidad como en la superficie, las temperaturas disminuyen considerablemente lo cual se asocia al espesor

sedimentario estable que conforma la Subcuenca de Maturín (Figura 4.3).

**Sección A-A':** De 430 Km. en dirección este – oeste (Figura 3). Presenta hacia el oeste, entre los 2000 y 3500 metros de profundidad, un aumento abrupto de la temperatura, donde un sector de 420°K (146.85 °C) se encuentra rodeado por un sector a 380°K (106.85°C) abarcando un área amplia dentro de la sección donde su extensión, ubicación y valores de temperatura están controlados por la información de pozos (figura 4.4). Este aumento anómalo de temperatura se correlaciona con el ubicado a 2000 metros al noroeste de la Sección 2-2', reconociéndose una zona al norte de la Subcuenca de Guárico que presenta un crecimiento irregular de la temperatura alcanzando los 420°K (146.85 °C) entre 2000 y 3500 metros de profundidad.

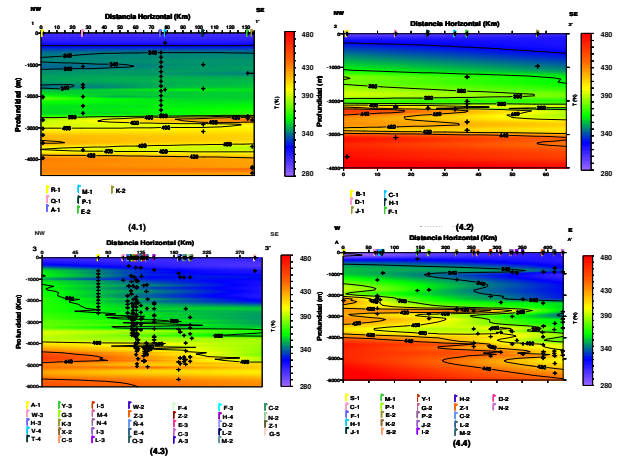


Figura 4. Secciones Termales: (4.1) Sección 1-1'; (4.2) Sección 2-2'; (4.3) Sección 3-3'; (4.4) Sección A-A'

Para tener una visión general de la situación geodinámica en el área y determinar si algún evento termal se asocia con un rasgo tectónico específico se integró la información estratigráfica obtenida con base a los datos de pozos, la información tectónica a partir de los transectos sísmicos y la información termal compilada de los valores de BHT. Las características destacadas para la integración de cada sección son:

**Integración de Sección 1-1':** Engrosamiento de sedimentos Oligocenos y Miocenos asociados a la profundización de la Subcuenca de Guárico hacia la zona suroeste de la sección. La integración de la sección no presenta ninguna característica térmica anómala.

**Integración de Sección 2-2':** Levantamiento de sedimentos Miocenos, al sureste, originado por la falla asociada al Graben de Espino y abultamiento en sedimentos Cretácicos y Oligocenos que coincide con el extremo mas sureste del sector de temperatura anómala a aproximadamente 2000 metros. Sin embargo, hacia el noroeste de la sección termal no se logra asociar ningún evento tectónico. Por lo tanto, no podría asociarse el alto de temperatura evidenciado en la sección termal con algún rasgo tectono-estratigráfico importante en la zona.

**Integración de Sección 3-3':** Levantamiento de sedimentos Cretácicos por distintos corrimientos hacia el

norte y sur del Corrimiento de Piritál, y profundización de los sedimentos Oligocenos y Miocenos hacia el sur del Corrimiento para elevarse de nuevo hacia el final de la sección. No obstante, al relacionarlo con la sección termal, el sistema de fallas asociado al Corrimiento de Piritál no parece influir de forma determinante en la situación térmica de la zona.

Integración de Sección A-A': Subsistencia en los sedimentos Cretácico – Mioceno, al este, y levantamiento de sedimentos Miocenos al oeste, mismo observado en la sección 2-2'. Se presenta también un levantamiento de sedimentos Cretácicos y Oligocenos, en la zona entre el Graben de Espino y las fallas asociadas al Corrimiento de Piritál, ubicándose en la porción más sureste del área de temperatura anómalamente alta. Esta característica estructural, al no abarcar una porción significativa de la región de temperatura anómala, no puede relacionarse con la fuente del aumento de temperatura. Las curvas Temperatura vs. Profundidad integradas con la información geológica para cada pozo revelan que para las Secciones 2-2' y 4-4' el aumento de temperatura en una zona que, de forma regional, está a 320°K (46.85°C) se vincula a sedimentos Miocenos entre los 2000 y 3500 metros de profundidad.

**Flujo de calor en la Cuenca Oriental de Venezuela**

El flujo de calor geotérmico se obtiene a partir de la relación  $Q = \kappa * (\delta T / \delta z)$  en unidades de  $W/m^2$ , donde  $\kappa$  es la conductividad termal y  $\delta T / \delta z$  es el gradiente geotérmico. En este caso particular, se está asumiendo que no existe ninguna fuente de calor externa y ajena a todo lo que involucra el proceso propio de formación, evolución y establecimiento de una cuenca sedimentaria.

Al no poseer información confiable sobre la porosidad, permeabilidad, tipo y cantidad de fluido presente, ni sobre la litología exacta (en términos del porcentaje de existencia de cada sedimento) en los estratos geológicos atravesados por cada pozo analizado, las asunciones para la determinación de la conductividad serán más generales. Aunque el valor típico de conductividad termal ( $\kappa$ ) en rocas sedimentarias de  $2.3 \pm 2.0 W/mK$  (Beardsmore y Cull, 2001), al considerar la información de algunos pozos en la cuenca que revelan baja densidad (entre 1.5 y 2.2 gr/cc), la presencia de fluidos en los sedimentos y las altas porosidades, se apunta a la idea de una conductividad menor a 2.0 W/mK. Para este caso, el cálculo de flujo de Calor en la Cuenca Oriental de Venezuela se efectuó con una conductividad de 1.5 W/mK.

Para el cálculo del flujo de calor superficial se hizo una interpolación lineal pozo a pozo del gráfico temperatura vs. profundidad ajustando a la mayor cantidad de puntos de medición donde el gradiente geotérmico queda definido por el inverso positivo de la pendiente del ajuste lineal en las curvas. Agrupando todos los valores de flujo de calor superficial obtenidos para cada pozo se genera el mapa de flujo de calor superficial para la Cuenca Oriental de Venezuela (Figura 5).

Al comparar el mapa de flujo de calor para Venezuela extraído de la información del mapa de flujo de calor para

Sur América de Hamza y Muñoz (1996) (Figura 6) con el mapa de flujo de calor superficial obtenido para la Cuenca Oriental de Venezuela, se observa que coinciden los altos valores de flujo de calor en la Cuenca Oriental ( $60 - 75 mW/m^2$ ) con las franjas que identifican la mayor pérdida de calor del país que involucran flujos de calor mayores a los  $60mW/m^2$ . De igual forma coinciden las zonas de menor flujo de calor superficial obtenido para la Cuenca Oriental (menor a  $55 mW/m^2$ ) con la zona centro-oriental y oriental del país, donde decrece la pérdida de calor ( $20 - 60 mW/m^2$ ).

Al promediar los valores de flujo de calor para los sedimentos correspondientes a distintas edades geológicas, obtenidos a partir del gradiente termal para cada estrato geológico, se genera una curva de evolución termal con el tiempo (Figura 7), que va desde sedimentos Cretácicos hasta sedimentos Miocenos. En el comportamiento termal hasta los 5.3 Ma se evidencia el enfriamiento de la Cuenca Oriental asociado a la fase del Margen Pasivo donde el flujo de calor disminuye de  $55 mW/m^2$  en promedio para sedimentos Cretácicos hasta  $36 mW/m^2$  en promedio para sedimentos Miocenos. No obstante, a partir de aproximadamente 5.3 Ma hacia el presente el comportamiento termal se invierte demostrando el comienzo de un aumento de la temperatura y con él, un aumento del flujo de calor.

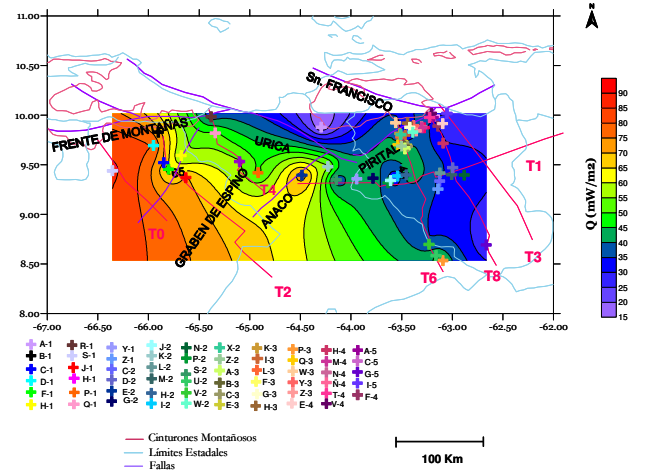


Figura 5. Flujo de calor superficial para la Cuenca Oriental de Venezuela

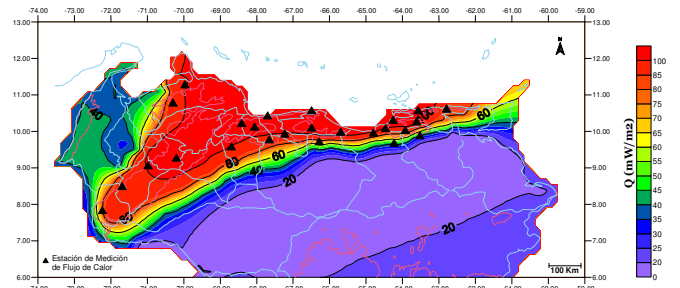


Figura 6. Flujo de Calor en Venezuela (modificado de Hamza y Muñoz, 1996), donde el área enmarcada delimita la zona de estudio.

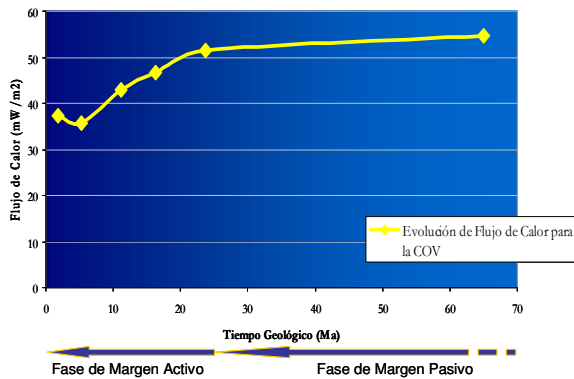


Figura 7. Evolución Termal de la Cuenca Oriental de Venezuela.

### Hipótesis que explican la anomalía térmica de la Cuenca Oriental de Venezuela

**Hipótesis Epirogénica:** Se puede pensar en la existencia de una característica epirogénica puntual (i.e. pluma de manto) directamente bajo el área norte de la Cuenca Oriental de Venezuela que está elevando los gradientes termales en la zona. No obstante, si bien es cierto que se registran aumentos bruscos en la temperatura, también lo es que si estuviesen relacionados a una fuente puntual bajo el área de estudio, las isotermas estarían concentradas directamente sobre la fuente y los gradientes correspondientes serían más fuertes hacia la base de la anomalía para disminuir hacia la superficie. Este comportamiento no es el observado en las isotermas analizadas, lo que permite pensar que no existe ninguna fuente puntual epirogénica, al menos directamente bajo la Cuenca oriental de Venezuela, que esté generando las altas temperaturas.

**Hipótesis Tectónica:** Otra causa de las altas temperaturas encontradas en el área podría estar vinculada a procesos tectónicos importantes. Sin embargo, la información sísmica con la que se trabajó en cada perfil analizado no revela ninguna característica tectónica que pueda relacionarse con la presencia de los altos gradientes de temperatura.

**Hipótesis de Fallamiento Rumbo-Deslizante:** Se podría pensar que los desplazamientos asociados al sistema de fallas transcurrentes San Sebastián - El Pilar, al noroeste de Venezuela, sean tales que se involucre material magmático que actúe aumentando las temperaturas del norte de la Cuenca Oriental de Venezuela. Rodríguez y Sousa (2004) demuestran un adelgazamiento cortical en la Cuenca de Falcón, y proponen la existencia de fallas transcurrentes asociadas al sistema de fallas Oca - Ancón que atraviesan toda la corteza. El movimiento relativo entre estas fallas es del tipo transtensional, permitiendo la generación de un patrón de fallamiento normal junto a un adelgazamiento cortical que evidencian por información gravimétrica. Un adelgazamiento de la corteza implica una compensación de densidades que permite que el material magmático más denso y caliente

ascienda. Sin embargo, para que una falla transcurrente atraviese toda la corteza debe convertirse en un borde o falla transformante marcando así un borde activo de placas y desplazando litosfera (Kearey y Vine, 1996). En corteza continental es muy difícil encontrar sistemas de bordes transformantes, debido a que presenta muchas irregularidades reológicas que permiten que las rocas en la base de la corteza tengan un comportamiento que puede considerarse del tipo plástico y que, por lo tanto, no podrían ser separadas y desplazadas por una falla de este tipo.

**Hipótesis Regional: Interacción Caribe-Sur América:** La zona de alto flujo de calor es más extensa en Venezuela que el área estudiada abarcando el norte del país desde el Estado Falcón al occidente al Estado Sucre al oriente. Se conoce que la subducción de la Placa Caribe bajo la Placa Sur Americana comenzó en el Mioceno, Duque – Caro (1978) propone una activación de la subducción hace aproximadamente 10 Ma mientras que Audemard (1993, 1998) sugiere 5 a 3 Ma. La idea básica para esta hipótesis es que por subducción de la Placa Caribe bajo la Placa Sur Americana se estaría generando, al occidente del país, una cuña astenosférica que erosiona termalmente la base de la litósfera y produce un adelgazamiento litosférico en el Estado Falcón, elevando así las temperaturas en toda la región. En la zona nor-occidental, la subducción de la Placa Caribe es más perpendicular permitiendo la generación de una cuña astenosférica que abarca un área amplia y, asociado con ella, mayores valores de flujo de calor. Sin embargo, a medida que nos acercamos al noreste de Venezuela la polaridad de la subducción cambia, la subducción se hace más oblicua y la porción de la Placa Caribe que subduce se hace más inclinada lo que afecta el sistema termal al disminuir la amplitud de la cuña astenosférica asociada al proceso y, por ende, el área de altos valores de flujo de calor queda reducida.

**Hipótesis Local: Entrampamiento de Gases:** Una causa local para la presencia de una zona anómala de alta temperatura y alto flujo de calor observados en estratos Miocenos, entre los 2000 y 3500 metros de profundidad, podría ser un entrampamiento de gas. Gracias a fallas y emplazamientos tectónicos relacionados al Corrimiento Frontal de Guárico, de edad Paleoceno-Eoceno, litologías con presencia de gas son levantadas. Por otra parte se conoce que la Cuenca Oriental de Venezuela es una región muy arcillosa, mineral caracterizado, entre otras cosas, por baja conductividad del calor. Así, se encuentra una capa de arcillas miocenas que estarían actuando como sello del gas, entrampándolo, impidiendo el flujo de calor hacia la superficie y haciendo que se concentre bajo estos sedimentos miocenos aumentando entonces sus valores. La presencia de gradientes altos de temperatura al norte de la Cuenca Oriental de Venezuela y su vínculo un entrampamiento de gas fue propuesto por F. Urbani (1991). Según él, el proceso compresivo de norte a sur, por el efecto de compresión adiabática de los fluidos eleva la temperatura en una franja paralela al frente de montañas, produciendo gran aumento del gradiente geotérmico de la región (7°C/100m).



## Conclusiones

Con base a información de 5 transectos sísmicos, de BHT y de profundidades de topes geológicos para 57 pozos distribuidos en la Cuenca Oriental de Venezuela se logró la elaboración de secciones termales para el norte de la Cuenca Oriental de Venezuela, donde se identificó una zona anómala de alta temperatura de 420 °K (146.85°C) entre 2000 y 3500 metros de profundidad, correspondientes a sedimentos de edad Mioceno.

Generalizando la situación litológica de la cuenca se propone que la conductividad termal de la zona debe ser menor a 2 W/mK. Para este caso en particular, empleando una conductividad termal de 1.5 W/mK se logra obtener una respuesta real de flujo de calor para el sector norte de la Cuenca Oriental de Venezuela.

Quedó evidenciado que existe una zona de alto flujo de calor para la región norte de la Subcuenca de Guárico y para las cercanías de la Subcuenca de Maturín, donde los valores asociados son de 60 a 75 mW/m<sup>2</sup>. Sin embargo, los valores disminuyen medida que se profundiza la Subcuenca hacia el Este.

Se logra ubicar en la historia termal de la Cuenca Oriental de Venezuela, un episodio anómalo de alto flujo de calor a partir de los 5.3 Ma (Mioceno), tiempo que corresponde al inicio de la subducción de la Placa Caribe bajo la Placa Sur Americana al noroeste de Venezuela. Este evento de carácter local podría estar asociado al proceso geodinámico del Frente de Deformación de Guárico, gracias al cual se genera una compresión adiabática de gases que actúan aumentando los gradientes geotérmicos en la zona norte de la Subcuenca de Guárico.

El alto flujo de calor observado al norte de la Cuenca Oriental de Venezuela, es un fenómeno que abarca toda la región norte del país, donde se observan valores superiores a los 60 mW/m<sup>2</sup>. La causa de este fenómeno regional podría estar vinculado con la interacción entre la Placa Caribe y la Placa Sur Americana, determinada hacia el occidente, centro y centro-oriente de Venezuela por un sistema de subducción Caribe bajo Sur América y cuya cuña astenosférica estaría afectando severamente el comportamiento termal del norte de Venezuela.

## Agradecimientos

A Petróleos de Venezuela Exploración y Producción División Oriente (PDVSA E&P, División Oriente) y a la Universidad Simón Bolívar por permitir la realización y publicación de este trabajo.

## Referencias

**Audemard, F.A., 1998.** *Evolution Géodynamique de la Façade Nord Sud-américane : Nouveaux Apports de l'Histoire Géologique du Bassin de Falcón, Vénézuéla.* Transaction of the 3rd Geological Conference of the Geological Society of Trinidad and Tobago. v.2, p. 327-340.

**Audemard, F.A., 1993.** *Néotectonique, Sismotectonique at Aleá Sismique du Nord-ouest du Vénézuéla (Système de Failles d'Oca-Ancón).* Tesis de Doctorado, Université Montpellier. 369p.

**Beardsmore, G.R., Cull, J.P.,** *Crustal Heat Flow. A guide to Measurement and Modelling.* Cambridge University press, 2001.

**Duque-Caro, H., 1978.** *Major Estructural Elements of Northern Colombia.* American Association of Petroleum Geologists, Memoir 29, p. 3.

**Hamza, V.M. y Muñoz, M., 1996.** *Heat flow map of South America.* Geothermics, 6, 599-646,

**Kearey P., Vine F. J.,** *Global Tectonics.* Blackwell Science, 1996.

**Olivares, C., Alvarez, M. A., Gómez, M. C., 2001.** *Origin, Maturity and Genesis of the Venezuelan Source Rocks.* Conferencia Goldschmidt de Geoquímica.

**Rodríguez, J., Sousa, J.C., 2004.** *Modelado Geológico – Geofísico a Través de la Cuenda de Falcón.* Trabajo de Grado, Universidad Central de Venezuela.

**Urbani, F., 1991.** *Geotermia en Venezuela.* GEOS N° 31, Página 1. Universidad Central de Venezuela.