

RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA PALEOTERMAL DE LA SUBCUENCA DE LA BAJA GUAJIRA, COLOMBIA

Mario García González¹, Ricardo Mier Umaña¹ y Luis Enrique Cruz Guevara¹

RESUMEN

La reconstrucción de la historia paleotermal de la Subcuenca de la Baja Guajira se realizó empleando tres métodos: 1) Cálculo del gradiente geotérmico y flujo de calor actuales en la Subcuenca de la Baja Guajira, 2) reflectancia de vitrinita, y 3) huellas de fisión en apatitos y zircones.

Los nuevos análisis de huellas de fisión y de reflectancia de vitrinita, permitieron identificar cuatro eventos termales con las siguientes características: El evento termal más antiguo se presentó en el Cretácico Superior entre 95 y 65 Ma, el segundo evento termal se presentó en el Eoceno superior entre 40 a 35 Ma, el tercer evento termal ocurrió en el Mioceno inferior a medio entre 22 a 15 Ma. El cuarto y último evento termal tuvo lugar en el Mioceno superior entre 10 y 5 Ma.

Los eventos de enfriamiento coinciden con cuatro discordancias previamente identificadas: 1) la discordancia al tope de la Formación Guaralamai del Cretácico Superior, 2) la discordancia a la base de la Formación Siamana en el Eoceno superior, 3) la discordancia al tope de la Formación Siamana en el Mioceno inferior y medio, y 4) la discordancia al tope de la Formación Castilletes en el Mioceno superior.

Palabras claves: Baja Guajira, Historia Paleotermal, Reflectancia de vitrinita, Huellas de fisión en apatito y circón.

ABSTRACT

The paleothermal history of the Coger Guajira Sub-basin was achieved using three methods: 1) calculation of the presents geothermal gradient and heat flow, 2) vitrinite reflectance and, 3) fission track analysis on apatites and zircon grains.

New analytical data of vitrinite reflectance and fission tracks allowed identifying four termal events with the following features: The oldest termal event took place during the Late Cretaceous between 95 and 65 Ma. The second termal event occurred during the late Eocene between 40 and 35 Ma. The third termal event occurred in the Early and Middle Miocene between 22 and 15 Ma. The fourth and last termal event took place in the Late Miocene between 10 and 5 Ma.

The cooling events match with four unconformities previously identified: 1) the Late cretaceous unconformity at the top of the Guaralamai Formation, 2) The Late Eocene unconformity at the base of the Siamana Formation, 3) The Early to Middle Miocene unconformity on the top of the Siamana Formation, and 4) The Late Miocene unconformity on the top of the Castilletes Formation.

Key words: Guajira Basin, Paleothermal history, Vitrinite reflectance, Apatite and zircon fission tracks.

¹ Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología. Bucaramanga, Santander, Colombia. A.A. 678. mgarcia@uis.edu.co, rimier@uis.edu.co, leacruz@uis.edu.co

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta nueva información a partir de muestras de roca recolectadas en afloramientos de la Serranía de Cosinas y muestras de zanja, correspondientes a pozos perforados en el área de estudio, de las cuales se obtuvieron datos de huellas de fisión en apatitos y zircones y análisis de reflectancia de vitrinita.

LOCALIZACIÓN

Geológicamente la subcuenca de la Baja Guajira, se encuentra localizada al norte de Colombia y forma parte de la Cuenca de la Guajira (Figura 1). Limita al norte con la Falla de Cuiza, que a su vez constituye el límite con la subcuenca de la Alta Guajira. Hacia el oeste limita con el Mar Caribe, que forma parte de la denominada Cuenca Guajira Costa Afuera, hacia el Sur limita con la Falla de Oca y hacia el Este su límite es el Golfo de Venezuela, que constituye la frontera con el Estado Venezolano (Barrero et al., 2007).

ESTRATIGRAFÍA

Las formaciones presentes en la Subcuenca de la Baja Guajira comprenden el rango de edades va desde el Jurásico Inferior hasta el reciente, abarcando ambientes de depositación continentales y marinos (Figura 2). Pulido et al. (1991) considera que en términos generales, la secuencia mesozoica de la Subcuenca de la Baja Guajira es similar a la descrita para la Cuenca de Maracaibo.

En la Subcuenca de la Baja Guajira las rocas pre-mesozoicas y mesozoicas afloran en la región norte de la Serranía de Cosinas (ver Figura 3). El basamento pre-mesozoico aflora en la región noroeste de subcuenca, al oeste de la Serranía de Cosinas, al igual que las rocas de edad triásica y jurásica.

En relación con las unidades Cretácicas aflorantes en la Subcuenca de la Baja Guajira, según Rodríguez y Londoño (2002) las formaciones Palanz, Moina, Yuruma, Apón, Macara, La Luna y Guaralamai afloran en la Serranía de Cosinas. Según Rubio et al. (1998) estas unidades litoestratigráficas están restringidas a la parte sureste de la Falla de Oca, (ver Figura 3)



FIGURA 1. Mapa de la Península de la Guajira mostrando los rasgos fisiográficos y tectónicos que caracterizan y delimitan la Subcuenca de la Baja Guajira. 1) Sierra Nevada de Santa Marta, 2) Serranía de Perija, 3) Serranía de Cosinas, 4) Serranía de Jarara, 5) Serranía de Macuira, 6) Cuenca de Cesar-Ranchería, 7) Subcuenca de Portete y 8) Subcuenca de Cocinetas. Tomado de Rubio et al. (1998).

SUBCUENCA BAJA GUAJIRA

CUENCA LAGO MARACAIBO

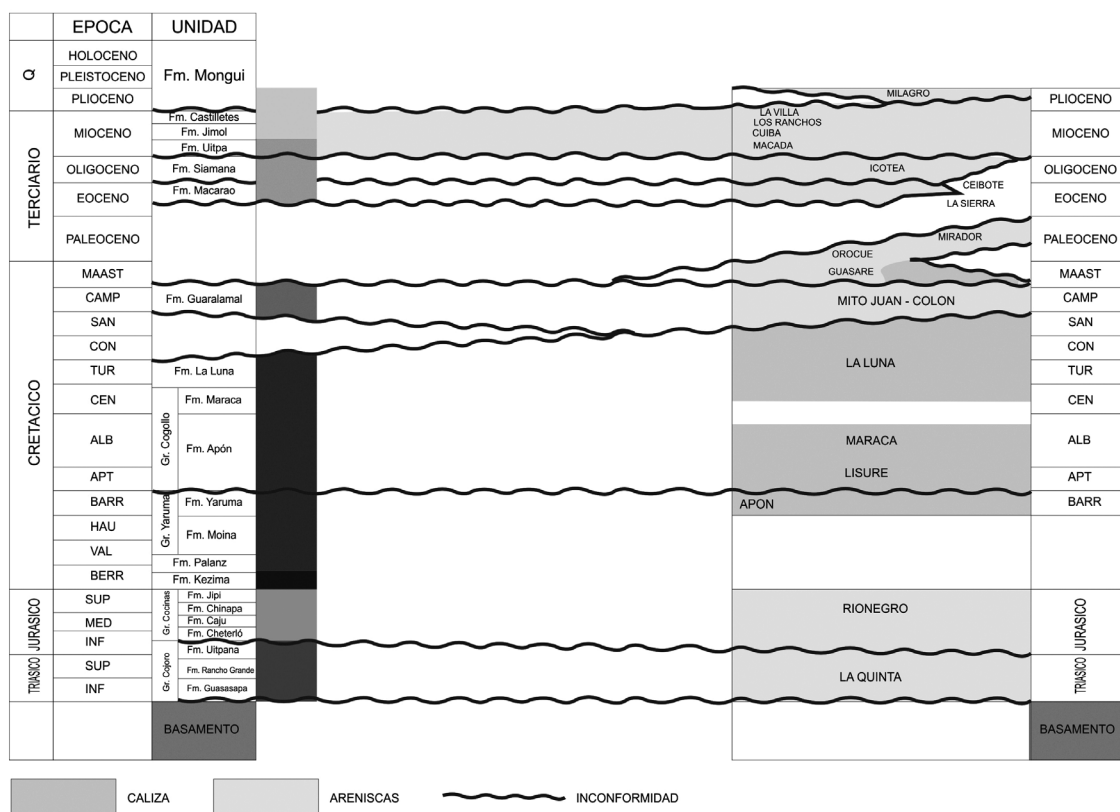


FIGURA 2. Columna estratigráfica generalizada de la Subcuenca de la Baja Guajira y su correlación cronoestratigráfica con la Cuenca de Maracaibo en Venezuela, Tomada de García-González et al. (2009).

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El ambiente tectónico compresivo que actuó a lo largo del límite noroccidental de la Placa Suramericana antes del Oligoceno formó las principales estructuras en la Península de La Guajira: (1) Fallas de cabalgamiento y fallas normales de dirección N-NE a NE, cortadas y desplazadas por (2) un sistema de fallas de dirección E-W a NW-SE (Rodríguez y Londoño, 2002; ver Figura 3). Las fallas de dirección E-W son más jóvenes que el sistema regional N-NE y producen un movimiento compuesto tanto en el rumbo como en la vertical y son las responsables del levantamiento, hundimiento y desplazamiento horizontal hacia el este de los bloques que conforman las diferentes serranías de la Península de La Guajira (Cosinas, Simarúa, Jarara, Macuira y Cosinas; Rodríguez y Londoño, 2002).

En la Península de La Guajira la mayoría de los esfuerzos tectónicos están restringidos a la cercanía de las fallas de rumbo dextrales de Oca y Cuisa y están directamente

relacionados con los movimientos transcurrentes de esas fallas (Cardona et al., 2007)

Cuatro eventos de deformación afectan la región de la Guajira: 1) “Rifting” del Eoceno tardío, en una dirección E-W que produce “Half-grabens” en la parte norte del área; 2) Transtensión del Oligoceno en la parte sur del área, expresado por fallamiento lateral derecho y formación de cuencas extensionales; 3) Transtensión del Mioceno temprano y medio, y 4) Levantamiento Andino del Mioceno tardío – Plioceno temprano simultáneo con el relleno clástico de las cuencas, tanto de la región continental “Onshore” como de costa afuera “Offshore” (Vence, 2008).

La Subcuenca de la Baja Guajira denominada inicialmente como “Onshore Guajira Basin” por Barrero et al. (2005-2006), está limitada al norte por el tren de fallas de Cuisa, al sur por la falla de Oca (Figura 3) y se prolonga hacia el oeste en la plataforma (Cuenca Guajira Offshore) y más al oeste se conoce como la depresión de Tayrona (Escalante, 2006; Ramírez, 2006). Al este se extiende hacia la Cuenca del Golfo de Venezuela.

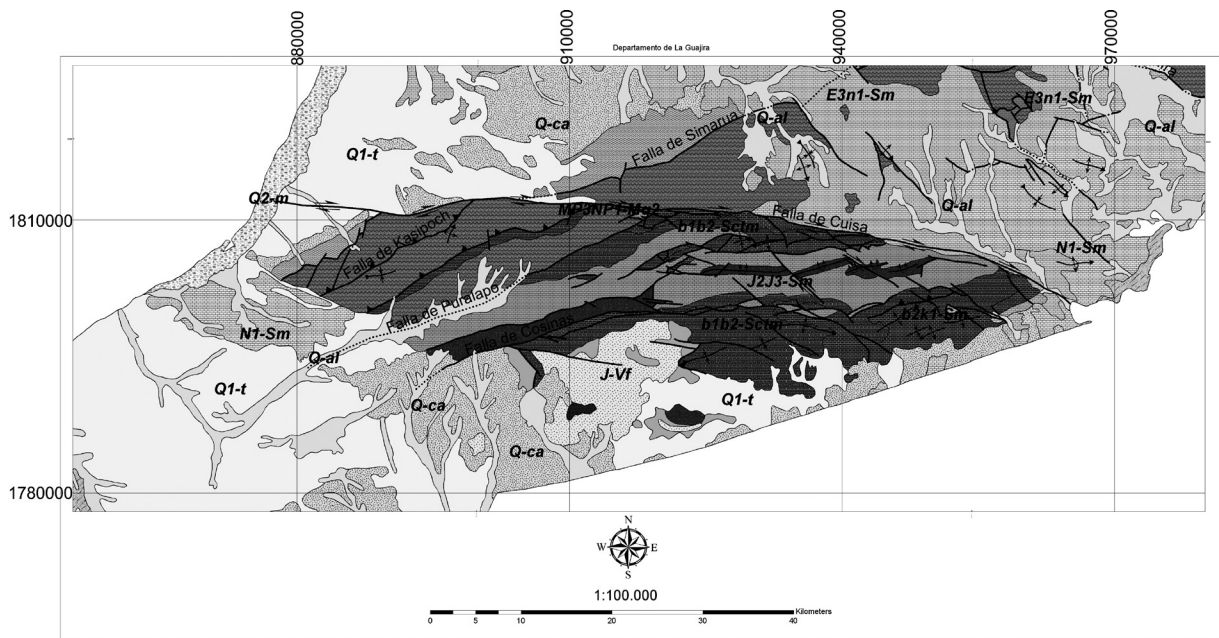


FIGURA 3. Geología área de la Serranía de Cosinas mostrando las fallas principales de la región Modificado de Gómez *et al.* (2007 a)

GRADO DE MADURACIÓN TERMAL

El estado de maduración termal de la secuencia estratigráfica aflorante en la Serranía de Cosinas fue determinado inicialmente a partir de datos de reflectancia de vitrinita (%Ro).

La toma de muestras se hizo de acuerdo a la posición estratigráfica, ya que en el área de estudio se presentan rocas sedimentarias de edad jurásica, cretácica y paleogena, las cuales son de gran importancia en la generación de hidrocarburos. La localización de estas muestras fue georeferenciada. La preparación de las muestras pulidas siguió la norma norma ASTM E 1558-09. El análisis de reflectancia de vitrinita empleó la norma ASTM D2798 utilizando un microscopio de luz reflejada Carl Zeiss Axiotron con fotómetro MPM 400 del laboratorio de geoquímica de la Universidad Industrial de Santander

Los datos de porcentaje de reflectancia de vitrinita (%Ro) de las muestras de afloramiento recolectadas en la Serranía de Cosinas presentan valores de %Ro que varían entre 1.18 y 1.4% como se ilustra en la tabla 1. Los anteriores valores muestran una clara tendencia de incremento de la reflectancia de vitrinita (%Ro) con la

edad. Así mismo los valores de %Ro son claramente superiores a los encontrados en las formaciones de edad Paleógena y Neógena, indicando que la secuencia Cretácica y Jurásica estuvo enterrada a mayores profundidades y fué levantada hasta su posición actual en la Serranía de Cosinas.

La reconstrucción de la historia paleotermal de la Subcuenca de la Baja Guajira se realizó empleado tres métodos: 1) Cálculo del gradiente geotérmico y flujo de calor actuales en la Subcuenca de la Baja Guajira, 2) reflectancia de vitrinita, y 3) huellas de fisión en apatitos y zircones las cuales registran las temperaturas de enfriamiento ocurridas durante los diferentes levantamientos de la cuenca así como también las edades de estos eventos. Las metodologías anteriores permiten hacer un análisis inverso que registra eventos de calentamiento y enfriamiento de la cuenca.

El gradiente geotérmico actual se calculó a partir de las temperaturas de fondo de pozos (BHT) reportadas en registros de pozo de la subcuenca (ver Figura 5).

La Figura 5 ilustra el gradiente geotérmico lineal obtenido al graficar estas temperaturas con respecto a la profundidad.

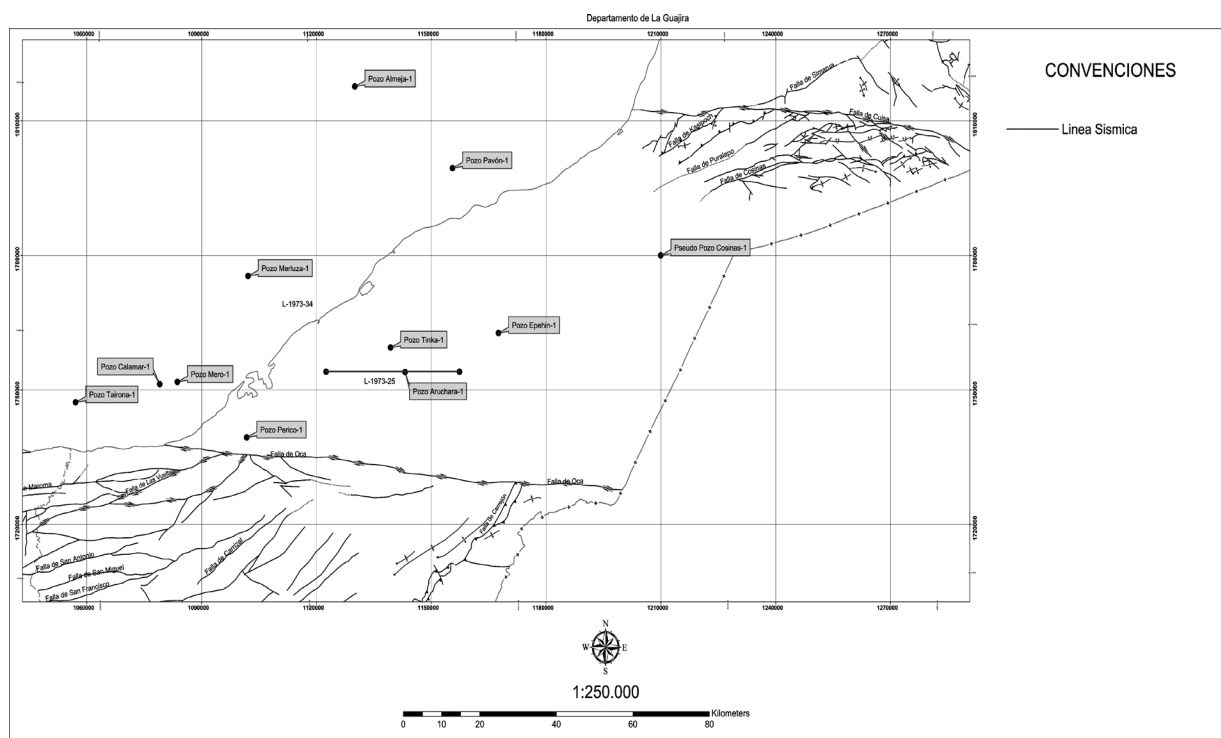


FIGURA 4. Localización de los pozos perforados y de la línea sísmica L-1973-25. Subcuenca de la Baja Guajira.

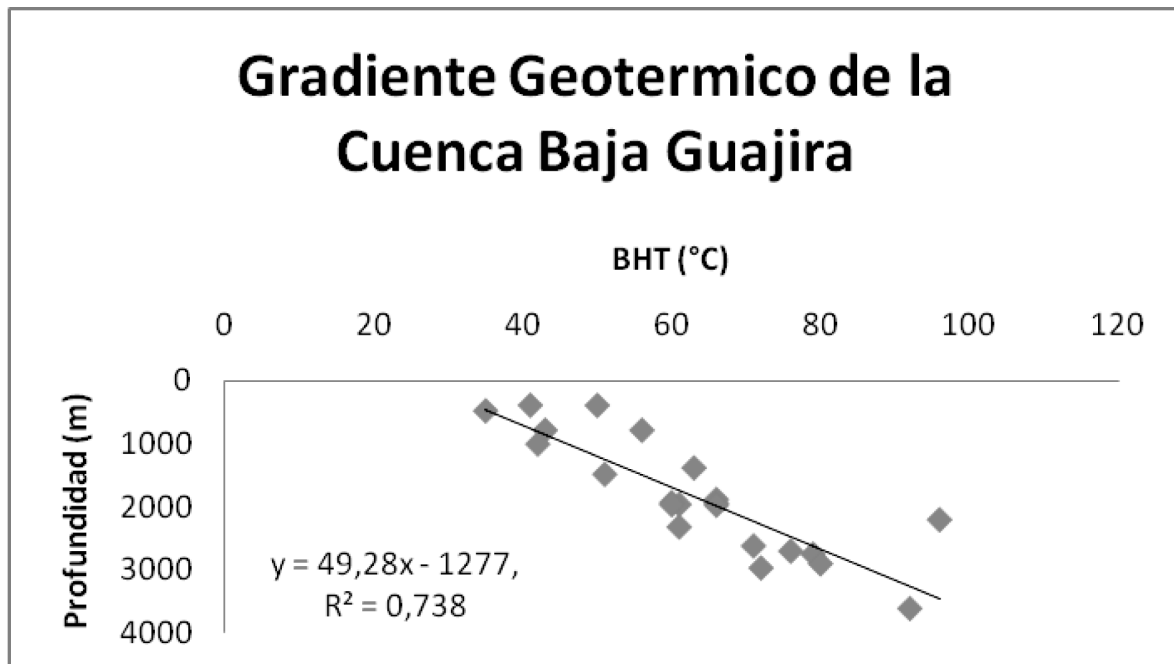


FIGURA 5. Gradiente geotérmico lineal para la Subcuenca de la Baja Guajira obtenido de la gráfica de temperaturas de fondo (°C) vs. Profundidad.

La Figura 5 indica que el gradiente geotérmico de la Subcuenca de la Baja Guajira se comporta de manera lineal, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.7385$ y un valor medio de $59.7^\circ\text{C}/\text{km}$. Así mismo la Figura 5 permite calcular la temperatura superficial actual, que corresponde a 31°C , la cual también se presenta en otras cuencas de Colombia.

El flujo de calor actual se calculó por medio de la ecuación de Fourier a partir de las temperaturas de fondo (BHT) tomadas de los pozos de la Subcuenca de la Baja Guajira (Figura 5) y de las conductividades térmicas de las unidades litoestratigráficas identificadas a partir de las líneas sísmicas de la Subcuenca de la Baja Guajira.

Para el cálculo de la conductividad térmica de las diferentes unidades litoestratigráficas inferidas se utilizó el método de Brigaud et al. (1990), que permite calcular la conductividad térmica de cada secuencia sísmica identificada in-situ, sobre la base de las velocidades de los registros sísmicos. Los resultados obtenidos indican que la secuencia sísmica superior entre 0 y 2199 pies de profundidad tiene una conductividad térmica in situ (λ) de 1.8 W/K/m ; la secuencia sísmica entre 2100 y 4600 pies tiene una conductividad térmica de 2.5 W/K/m y la secuencia entre 4600 y 8100 pies tiene una conductividad de 3.9 W/K/m (Figura 6).

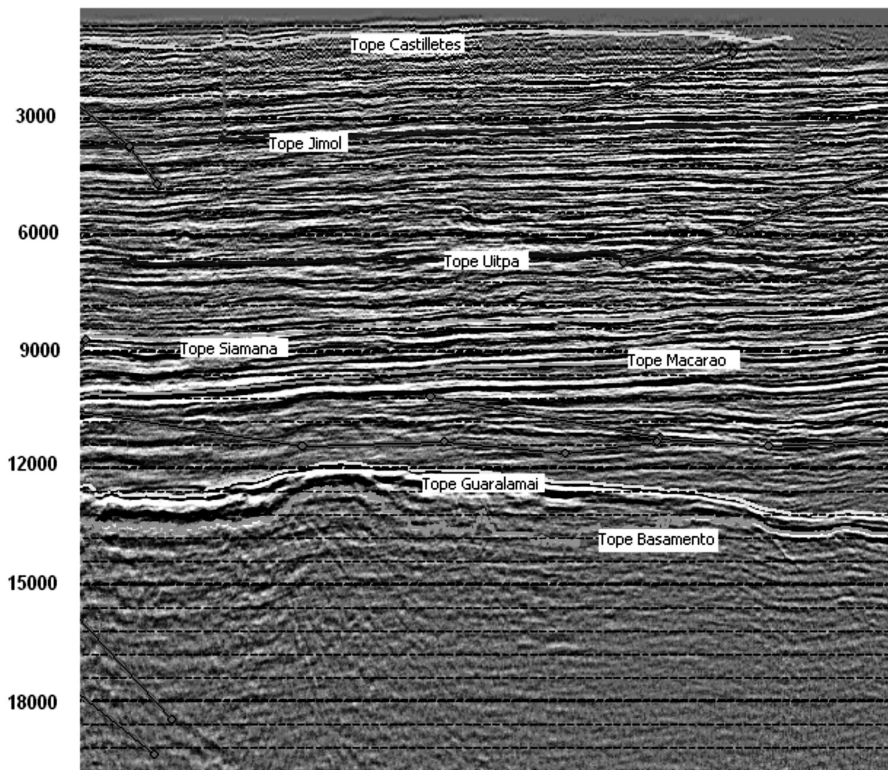


FIGURA 6. Perfil sísmico obtenido de la línea sísmica L-1973-25 en dirección E-W ilustrando la sedimentación en la plataforma continental desde el Cretáceo Superior hasta el Pleistoceno, con una acumulación de 13,000 pies de sedimentos. La localización del perfil se incluye en la Figura 4.

Una vez calculadas las conductividades térmicas se procedió a calcular los flujos de calor presentes en las secuencias sísmicas antes mencionadas empleando la ecuación de Fourier. Los resultados obtenidos son: secuencia sísmica superior 44.2 mW/m^2 , secuencia sísmica intermedia 47.2 mW/m^2 , y secuencia sísmica inferior 52.9 mW/m^2 .

El estado de maduración termal de la secuencia estratigráfica aflorante en la Serranía de Cosinas

fue determinado inicialmente a partir de datos de reflectancia de vitrinita (%Ro). Los datos de porcentaje de reflectancia de vitrinita (%Ro) de las muestras de afloramiento recolectadas en la Serranía de Cosinas presentan valores de %Ro que varían entre 1.18 y 1.4% como se ilustra en la Tabla 1. Estos valores muestran un incremento de la reflectancia de vitrinita (%Ro) con la edad. Los valores de %Ro son claramente superiores a los encontrados en las formaciones de edad Paleógena y Neógena, indicando que la secuencia Cretácica y

Jurásica estuvo enterrada a mayores profundidades y fué levantada hasta su posición actual en la Serranía de Cosinas.

La reflectancia de vitrinita en las formaciones del paleógeno presenta un promedio de %Ro de 0.41 %. Las formaciones del Cretácico presentan %Ro entre 1.18 y 1.24%, y las formaciones pre-Cretácicas presentan valores de % Ro entre 1.31 y 1.57%. Es decir que la %Ro aumenta con la edad de las formaciones. En términos generales la secuencia Neógena muestra datos anormalmente altos debido a que las partículas de vitrinita provienen de material derivado de formaciones más antiguas, ver Tabla 3.

El método de Burnham y Sweeney (1989) permite calcular las paleotemperaturas con base en los datos de %Ro. Los resultados de este cálculo se incluyen en las tablas 2 y 3. Se observa que las paleotemperaturas de las formaciones de edad Cretácea y Paleógena están entre 80 y 155°C indicando que están formaciones alcanzaron la ventana de generación de aceite y gas termogénico.

TABLA 1. Datos de %Ro en muestras de afloramiento de la Serranía de Cosinas

EDAD	FORMACIÓN	% Ro	Desv. Estándar
PALEÓGENO			
OLIGOCENO			
E5M3	Fm Siamana	1,08	0,18
CRETÁCICO			
SUPERIOR			
E10M1	Grupo Cogollo	1,18	0,23
E10M2	Grupo Cogollo	1,18	0,15
E16M1	Grupo Cogollo	1,21	0,24
E9M1	Grupo Cogollo	1,19	0,28
CRETÁCICO			
INFERIOR			
E11M1	Grupo Yuruma	1,24	0,15
E1M2	Grupo Yuruma	1,28	0,18
E17M1	Grupo Yuruma	1,31	0,29
JURÁSICO			
SUPERIOR			
E3M1	Fm Chinapa	1,4	0,19

TABLA 2. Máxima paleotemperatura obtenida de datos de Ro en muestras de la Serranía Cosinas, Subcuenca de la Baja Guajira, Colombia

Número de referencia	Identificación muestra	Unidad estratigráfica	Edad estratigráfica (Ma)	Reflectancia de vitrinita %Ro*1 (%)	Máxima paleotemperatura*2 (°C)
VR1	E1M2	Grupo Yuruma	146-100	1.28	161
VR2	E10M1	Fm Maraca	100-66	1.18	155
VR3	E10M2	Fm Maraca	100-66	1.18	155
VR4	E11M1	Grupo Yuruma	146-100	1.24	158
VR5	E16M1	Fm Maraco	100-66	1.21	157
VR6	E17M1	Grupo Yuruma	146-100	1.31	162
VR7	E3M1	Fm Jipi	162-146	1.40	167
VR8	E5M3	Fm Siamana	34-23	1.08	148
VR9	E8M1	Fm Macuira	>542	1.57	170
VR10	E16M1	Grupo Yuruma	146-100	1.21	157
VR11	E9M1	Fm Maraca	100-66	1.19	156

*1 Valores medidos de Ro

*2 Máxima paleotemperatura estimada de valores medidos de %Ro usando el algoritmo de Burnham y Sweeney (1989). Todos los estimados fueron determinados usando un gradiente de calentamiento asumida de 1°C/Ma y un gradiente de enfriamiento de 10°C/Ma.

Los resultados de %Ro medidos en 15 pozos de la Subcuenca de la Baja Guajira (Tabla 3), fueron graficados en función de la profundidad (Figura 7).

TABLA 3. Paleotemperaturas máximas a partir de datos de %Ro en muestras de pozo de la Subcuenca de la Baja Guajira.

Nombre del pozo	Profundidad (m)	Temperatura Actual* ¹ (°C)	Subdivisión Estratigráfica	Edad Estratigráfica (Ma)	Ro* ² (%)	Paleotemperatura Máxima* ³ (°C)
Sorpresa-1	?	?	Mioceno temprano	23-16	1.22	157
Ranchería-1	?	?	Mioceno tardío	12-5	0.79	127
Manaure-1	552	33	Mioceno tardío	16-12	0.97	142
Pavón-1	826	49	Mioceno medio	16-12	1.14	152
Maicao-1	1128	67	Mioceno tardío	12-5	0.48	83
Ballena-2	1417	84	Mioceno tardío	12-5	0.58	97
Chuchupa-5	1457	87	Mioceno medio	16-12	1.26	160
Chuchupa-6	1469	87	Mioceno tardío	12-5	0.58	97
Chuchupa-1	1530	91	Mioceno tardío	12-5	0.54	93
Ballena-1	1585	95	Mioceno medio	16-12	0.60	99
Tiburón-1	1637	98	Mioceno tardío	12-5	0.44	76
Almeja-1	1676	100	Mioceno medio	16-12	1.26	160
Riohacha-1	1804	108	Mioceno tardío	12-5	1.14	152
Mero-1	2179	130	Mioceno medio	16-12	0.49	84
Aruchara-1	2182	130	Mioceno tardío	12-5	0.87	135

*¹ Temperaturas actuales estimadas con base en el gradiente geotérmico actual indicado en la Figura 5.

*² Valores medidos de %Ro

*³ Máxima paleotemperatura estimada de los datos medidos de %Ro usando el algoritmo de Burnham y Sweeney (1989). Todos los estimados fueron determinados asumiendo una rata de calentamiento de 1°C/Ma y una rata de enfriamiento de 10°C/Ma.

La Figura 7 ilustra la distribución de las paleotemperaturas máximas calculadas a partir de datos de %Ro, reportados en la Tabla 3.

Los datos de %Ro de las muestras de pozo se graficaron en función de la profundidad (Figura 7) con el objeto de observar la tendencia del incremento de %Ro con la profundidad. Como se puede observar en la Figura 7, se presentan diferentes gradientes de reflectancia de vitrinita en la Subcuenca de la Baja Guajira, que sugieren que las formaciones Cretácicas con valores de %Ro de 1.4% estarían a profundidades entre 20.000 y 21.000 pies de profundidad, lo anterior es válido si se asume un gradiente geotérmico constante.

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE HUELLAS DE FISIÓN EN APATITO Y ZIRCÓN

Los análisis de huellas de fisión en apatitos (HFA) y zircones (HFZ) así como la interpretación de los mismos

fueron realizados por el Dr. I.R. Duddy de la empresa GEOTRAC de Australia, quien realizó los análisis e interpretación de resultados siguiendo la metodología descritas por Green et al (1989) Gleadow et al (1983).

Las muestras recolectadas para este estudio se obtuvieron en afloramientos de la Serranía Cosinas y en dos pozos de la Subcuenca de la Baja Guajira. Las tablas 4, 5 y 6 relacionan la lista de las muestras analizadas en afloramiento y pozos a partir de análisis de HFA y HFZ.

En el presente estudio se analizaron: 1) Apatitos de 18 muestras de afloramiento de edades Mesozoica y Paleógena, 2) apatitos de dos muestras de la secuencia Paleógena y Neógena obtenidas de muestras de zanja de los pozos Dorado-1 y Tayrona-1, y 3) Zircones obtenidos de dos muestras de afloramientos de edad Jurásica.

La Figura 8 ilustra la localización de las muestras de afloramiento recolectadas en el presente estudio.

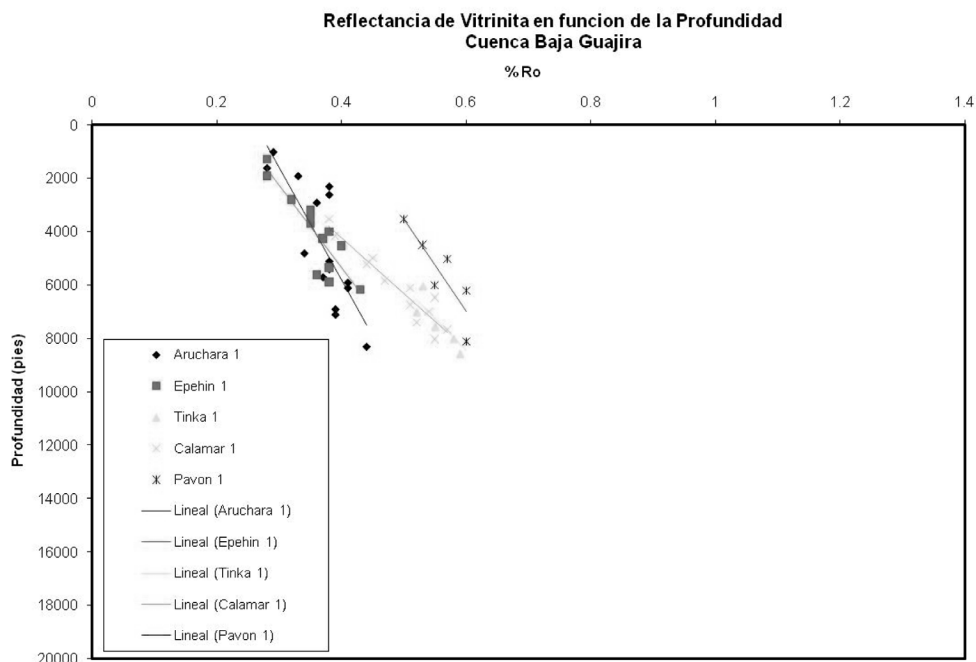


FIGURA 7. Reflectancia (%Ro) en función de profundidad para pozos perforados en la Subcuenca de la Baja Guajira.

TABLA 4. Resumen del análisis de las paleotemperaturas: Datos de HFA y obtenidos de muestras de afloramiento, Subcuenca de la Baja Guajira

Número de muestra	Unidad Estratigráfica	Edad Estratigráfica (Ma)	Paleotemperatura máxima (°C)	Evento(s) temprano(s)		Evento(s) tardío(s)		Reflectancia de Vitrinita equivalente (%)
				Episodio de enfriamiento (Ma)	Pico de paleotemperatura (°C)	Episodio de enfriamiento (Ma)		
E8M1	Macuira	>542	No apatito	-	-	-	-	-
E15M1	Cajú	176-161	>120	50 a 30	35 - 90	30 a 0	>0.74	>0.74
E3M1	Cajú	176-161	>105	45 a 18	-	-	>0.64	>0.64
E13M1	Cajú	176-161	110-120	42 a 26	50 - 70	22 a 2	0.67-0.74	0.67-0.74
E13M2	Cajú	176-161	>110	40 a 10	-	-	>0.67	>0.67
E13M3	Cajú	176-161	No apatito	-	-	-	-	-
E13M4	Cajú	176-161	120 - 130	45 a 35	45 - 70	18 a 0	0.74-0.82	0.74-0.82
E13M5	Cajú	176-161	No apatito	-	-	-	-	-
E14M1	Chinapa	161-146	>110	50 a 25	-	-	>0.67	>0.67
E1M1	Yuruma	146-100	No apatito	-	-	-	-	-
E1M2	Yuruma	146-100	>120	40 a 22	50-80	22 a 5	>0.74	>0.74
E1M3	Yuruma	146-100	>105	40 a 10	-	-	>0.64	>0.64
E1M4	Yuruma	146-100	No apatito	-	-	-	-	-
E2M1	Yuruma	146-100	>130	40 a 25	40 - 75	12 a 0	>0.82	>0.82
E11M1	Yuruma	146-100	No apatito	-	-	-	-	-
E11M2	Yuruma	146-100	>120	95 a 65	55 - 80	40 a 0	>0.74	>0.74
E17M1	Yuruma	146-100	?	?	110-120	22 a 12	0.67-0.74	0.67-0.74
E16M1	Yuruma	146-100	?	?	>100	35 a 0	>0.61	>0.61

Reconstrucción de la historia paleotermal de la subcuenca de la Baja Guajira, Colombia

E17M2	Yuruma	146-100	?	?	>110 y 30 - 60	22 a 15 y 10 to 0	>0.67
E9M1	Cogollo	100-66	>110	65 a 33	60 - 85	20 a 0	>0.67
E4M1	Siamana	34-23	95-110	55 a 5	-	-	0.56-0.67
E5M1	Siamana	34-23	115-130	45 a 20	40 - 95	24 a 0	0.70-0.82 or 0.30-0.56
E5M2	Siamana	34-23	No apatito	-	-	-	-
E5M3	Siamana	34-23	>110	55 a 35	45 - 100	34 a 0	0.31-0.61
E4M2	Siamana	34-23	>125	40 a 28	40 - 80	20 a 0	0.30-0.46
	Sincronismo AFTA	Post- deposición	(Ma) ^{*3}	95 a 65 y 40 a 35		22 a 15 y 10 a 5	

^{*1} Temperatura promedio de superficie en el presente asumido de 30 ° C

^{*2} Interpretación de la historia termal del HFA se basa asumiendo una rata de calentamiento de 1°C/Ma y una rata de enfriamiento de 10°C/Ma. Los rangos de paleotemperaturas y enfriamientos citados corresponden a límites de confiabilidad de ±95%.

^{*3} Controles en el sincronismo integrado del HFA basado en la superposición de controles de sincronismo obtenidas de muestras individuales asumiendo que estas representan episodios termales post-depositacionales regionales significantes y coherentes. Nótese que los controles integrados de sincronismo no incluyen controles de los episodios de proveniencia

^{*4} Calculados de temperaturas máximas derivadas de las medidas de % Ro usando la cinética de Burnham y Sweeney (1989).

TABLA 5. Datos de huellas de fisión de zircón (HFZ) en muestras de afloramiento de la Subcuenca de la Baja Guajira, Colombia

Número de muestra GC	Número de fuente (campo #)	Edad estratigráfica (Ma)	Edad de huellas de fisión de zircón (Ma)	Edad de la población dominante de huella de fisión de zircón* ¹ (Ma)	Número de granos	Rangos posibles de edades deposicionales* ² (Ma)
1047-15	R093971 (E13M4)	176-161	154.7 ± 11.0	145.4 ± 5.7	18	157 a 133
1047-20	R093976 (E3M1)	176-161	133.6 ± 9.9	126.3 ± 5.8	18	138 a 114

^{*1} Edad central medida para la muestra en la cual las edades de huellas de fisión para granos individuales muestran más de una población.

^{*2} Edad de huellas de fisión de zircón promedio de la población dominante de edades.

^{*3} Límite de confiabilidad 95%.

TABLA 6. Resumen del análisis de paleotemperatura: Datos de HFA de muestras de pozo, Subcuenca de la Baja Guajira

Profundidad (m)	Temperatura actual* ¹ (°C)	Unidad Estratigráfica	Edad Estratigráfica (Ma)	Evento(s) temprano(s)			Evento(s) tardío(s)	
				Paleotemperatura máxima* ² (°C)	Episodio de enfriamiento* ² (Ma)	Pico de paleotemperatura* ² (°C)	Episodio de enfriamiento* ² (Ma)	Relfectancia de Vitrinta equivalente Romax* ⁴ (%)
631	29	Castilletes	12 a 5	>120	105 a 10	95 - 105	10 a 0	<0.64
1768	54	Castilletes	12 a 5	>120	40 a 22	-	-	<0.53%
		Sincronismo AFTA	Post-deposición	(Ma) ^{*3}	40 a 22		10 a 0	

^{*1} Temperatura de superficie en el presente asumida de 20°C y un gradiente geotermal de 22.5°C/km

^{*2} Interpretación de la historia termal del HFA se basa asumiendo una rata de calentamiento de 1°C/Ma y una rata de enfriamiento de 10°C/Ma.

^{*3} Controles en el sincronismo integrado del HFA basado en la superposición de controles de sincronismo obtenidas de muestras individuales asumiendo que estas representan episodios termales post-depositacionales regionales significantes y coherentes.

^{*4} Calculados de temperaturas máximas derivadas del HFA usando la descripción cinética de Burnham y Sweeney (1989).

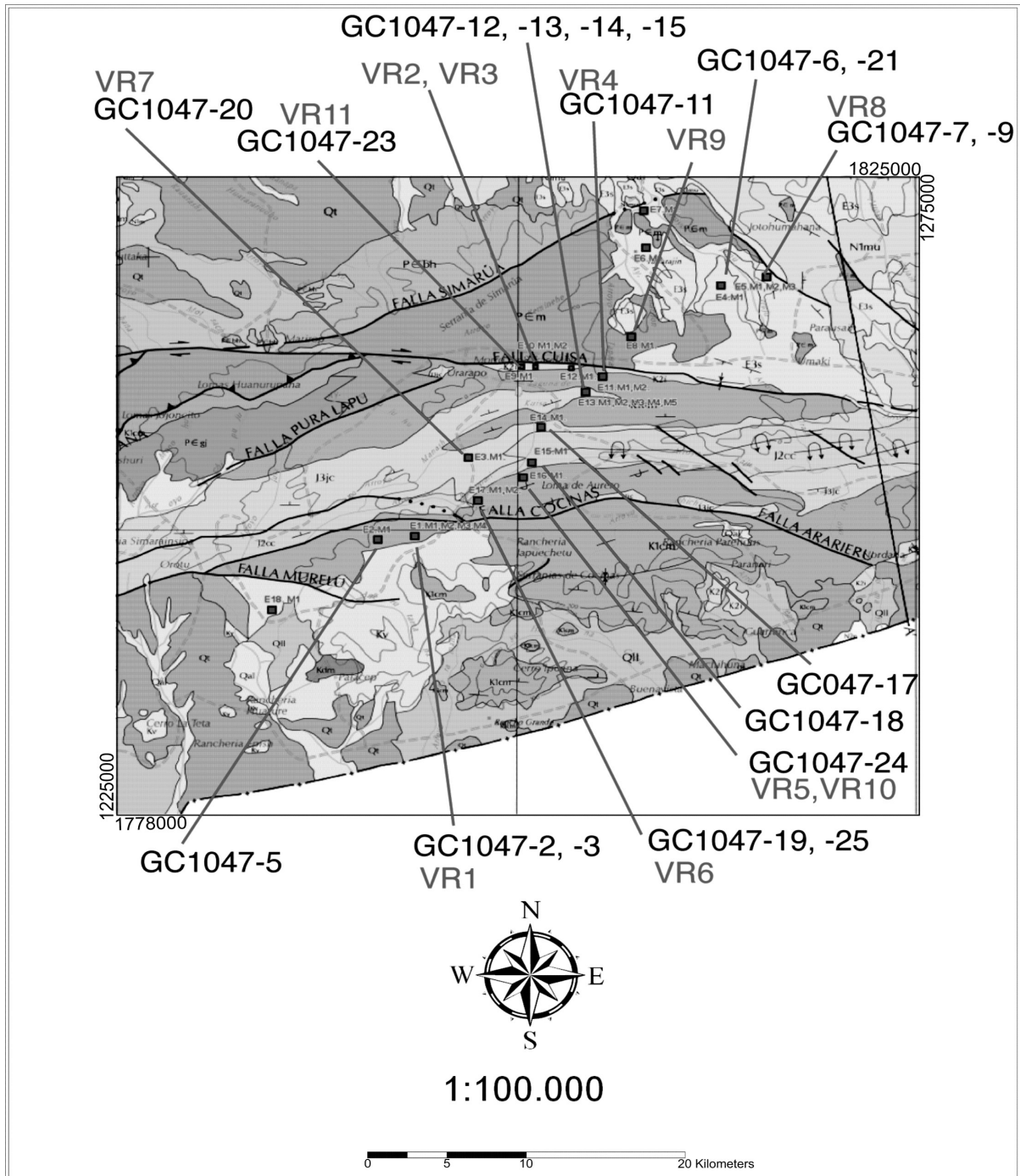


FIGURA 8. Localización de las muestras recolectadas para los análisis de HFA, HFZ y de reflectancia de vitrinita en la Serranía Cosinas, Subcuenca de la Baja Guajira. La tabla 2 indica la formación muestreada.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de los análisis de huellas de fisión en apatitos y zircones muestran la superposición en tiempo de eventos termales en las muestras de afloramiento del Mesozoico y del Paleógeno como se deduce de las tablas 4, 5 y 6. A partir de esta información se interpretó la existencia de cuatro episodios termales que afectaron la Subcuenca de la Baja Guajira (Figura 9), en donde el enfriamiento empezó en un algún tiempo dentro de los siguientes intervalos:

- 10 a 5 Ma (Mioceno Superior): La mayoría de las muestras
- 22 a 15 Ma (Mioceno Inferior a Medio): Tres muestras
- 40 a 35 Ma (Eoceno Superior): Trece muestras

- 95 a 65 Ma (Cretácico Superior): Una muestra

Como se ilustra en la Figura 9, el enfriamiento durante el Mioceno Superior (10 a 5 Ma) se observó en la mayoría de muestras con edades Mesozoica y Cenozoicas. Durante el Mioceno Inferior a Medio (22 a 15 Ma) tres muestras del Grupo Yuruma estuvieron expuestas a un enfriamiento. Durante el Eoceno Superior (40 a 35 Ma) Varias muestras de las formaciones Cajú, Chinapa, Yuruma y Cogollo estuvieron expuestas al enfriamiento. El evento de enfriamiento más antiguo ocurrió en el Cretácico Superior (95 a 65 Ma) como lo indica una muestra del Grupo Yuruma. En el presente estudio se asume que todos los eventos de enfriamiento fueron ocasionados por levantamientos ocurridos a finales del Cretácico, el Eoceno y principalmente el Mioceno. Estos levantamientos están relacionados a discordancias reportadas por estudios estratigráficos expuestos anteriormente.

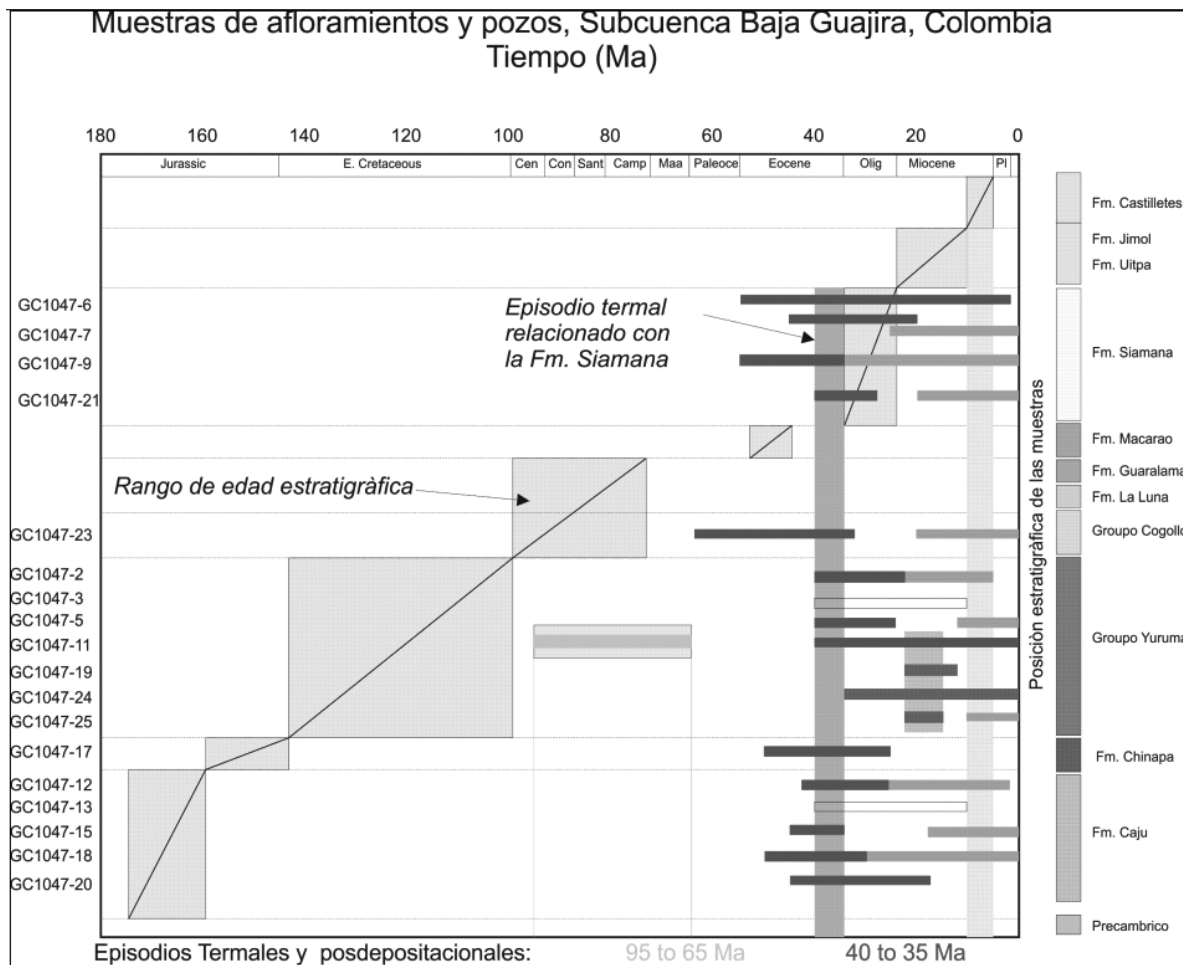


FIGURA 9. Secuencia de episodios de enfriamiento de la Subcuenca de la Baja Guajira, basados en análisis de HFA Y HFZ en muestras de afloramiento.

Es importante resaltar el registro de episodios termales post-depositacionales mostrados por una muestra de la Formación Siamana del Oligoceno, indicando que esta muestra sufrió un enfriamiento a partir de temperaturas superiores a las demás muestras del Oligoceno. Este enfriamiento ocurrió durante el episodio del Eoceno Superior (40-35 Ma) antes mencionado.

En la Figura 10 se ilustra la historia de enfriamiento de una muestra de la Formación Yuruma del Cretáceo inferior. Las paleotemperaturas máximas fueron calculadas a partir de los datos de %Ro, siendo las paleotemperaturas derivadas de % Ro entre de 20 a 40 °C más altas que la máximas determinadas por análisis de HFA.

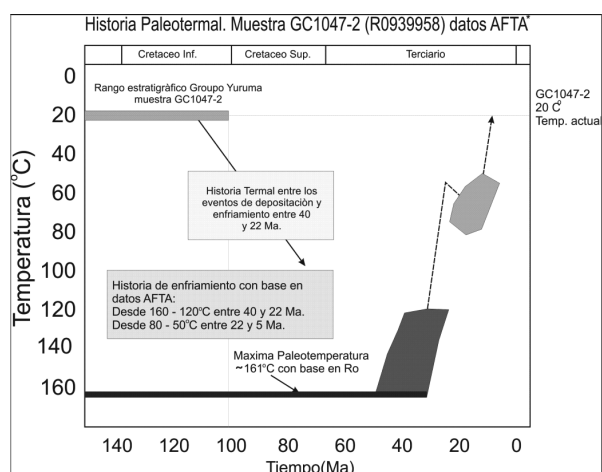


FIGURA 10. Historia termal derivada del análisis de huellas de fisión en apatito. Muestra de la Formación Yuruma, Serranía Cosinas, Subcuenca de la Baja Guajira. Muestra (E1M2 ver Tabla 2 equivalente GC1047-2). Los campos coloreados ilustran los dos eventos de enfriamiento de la muestra. El primer evento habría ocurrido entre los 40 y 22 Ma con una disminución de temperatura de 160 a 120°C. Un segundo evento de enfriamiento habría tenido lugar entre los 22 y 5 Ma, en el cual la muestra se enfrió de 80 a 50 °C hasta su temperatura actual entre 30 y 20 °C.

Las edades a partir de huellas de fisión en zircón (HFZ) fueron determinadas en dos muestras de la Formación Cajú identificándose la presencia de más de una población de edades.

El ajuste de los datos de HFZ dieron una asociación consistente de edades las cuales son significativamente más jóvenes que las edades depositacionales del Jurásico Medio (176-161 Ma) de la Formación Cajú, como se resumen en la tabla 5, en donde las edades obtenidas a partir de huellas de fisión de zircón están entre ~138 y 133 Ma (Cretáceo temprano)

La diferencia entre las edades de huellas de fisión de zircón y las edades depositacionales del Jurásico Medio pueden ser explicadas de dos formas: 1) La edad depositacional de las muestras es posterior al Jurásico Medio debido a que las edades de las huellas de fisión de zircón indican una edad correspondiente al Cretáceo inferior para la Formación Cajú. 2) Las dos muestras del Jurásico Medio de la Formación Cajú fueron calentadas a temperaturas superiores a 300°C durante el Cretáceo Temprano como lo indicarían las huellas de fisión en zircón.

La segunda hipótesis no se considera válida debido a que la reflectancia de vitrinita correspondiente a temperaturas >300°C es equivalente a 5% y los valores medidos en estas muestras son de 1.4% en Ro. En consecuencia la mejor explicación para los resultados de las huellas de fisión en zircón (HFZ) es que las edades depositacionales de las muestras GC1047-15 y 20 no corresponden al Jurásico Medio, sino al Cretáceo Inferior.

Los limitados resultados de huellas de fisión en apatitos (HFA) obtenidos de las dos muestras de pozo no proporcionaron evidencia clara de paleotemperaturas más altas que las temperaturas presentes post-depositacionales, pero si permiten calcular las posibles temperaturas máximas.

En el caso de la muestra GC1047-26 del pozo Dorado-1, se calculó una temperatura post-depositacional de hasta 105°C; mientras que para la muestra GC1047-35 del pozo Tayrona-1, se obtuvo una temperatura post-depositacional máxima de 90°C. La tabla 6 resume los resultados de los análisis de HFA en las muestras de pozo.

Los resultados de las huellas de fisión en apatitos AFTA en las muestras de los pozos Dorado-1 y Tayrona-1, indican que las edades de fisión son más antiguas que las edades de depositación. En consecuencia estos resultados se derivan del área de aporte de la Formación Castilletes y por tanto no pueden ser utilizadas para la reconstrucción termal de la Formación Castilletes en la Subcuenca de la Baja Guajira.

Por otra parte, los datos de HFA en estas muestras preservan información importante en la historia termal del área de aporte de los sedimentos de La Formación Castilletes los cuales se derivaron de sedimentos de edad Mioceno según lo indican los análisis de HFA en donde se identificaron dos eventos termales uno del Eoceno superior al Mioceno temprano identificado en

la muestra del pozo Tayrona-1, y otro evento termal de edad Mioceno superior al presente en la muestra del pozo Dorado 1. Estos dos eventos de enfriamiento identificados en muestras de pozo se han identificado en las muestras de afloramiento como se discutió anteriormente.

La Figura 11, ilustra la superposición del rango de temperaturas identificadas en los cuatro eventos termales que afectaron la Subcuenca de la Baja Guajira, así mismo se ilustra la distribución estratigráfica de estos eventos de enfriamiento. Es importante anotar que las muestras de apatitos de las formaciones Uitpa, Jimol y Castilletes no presentaron eventos post depositacionales.

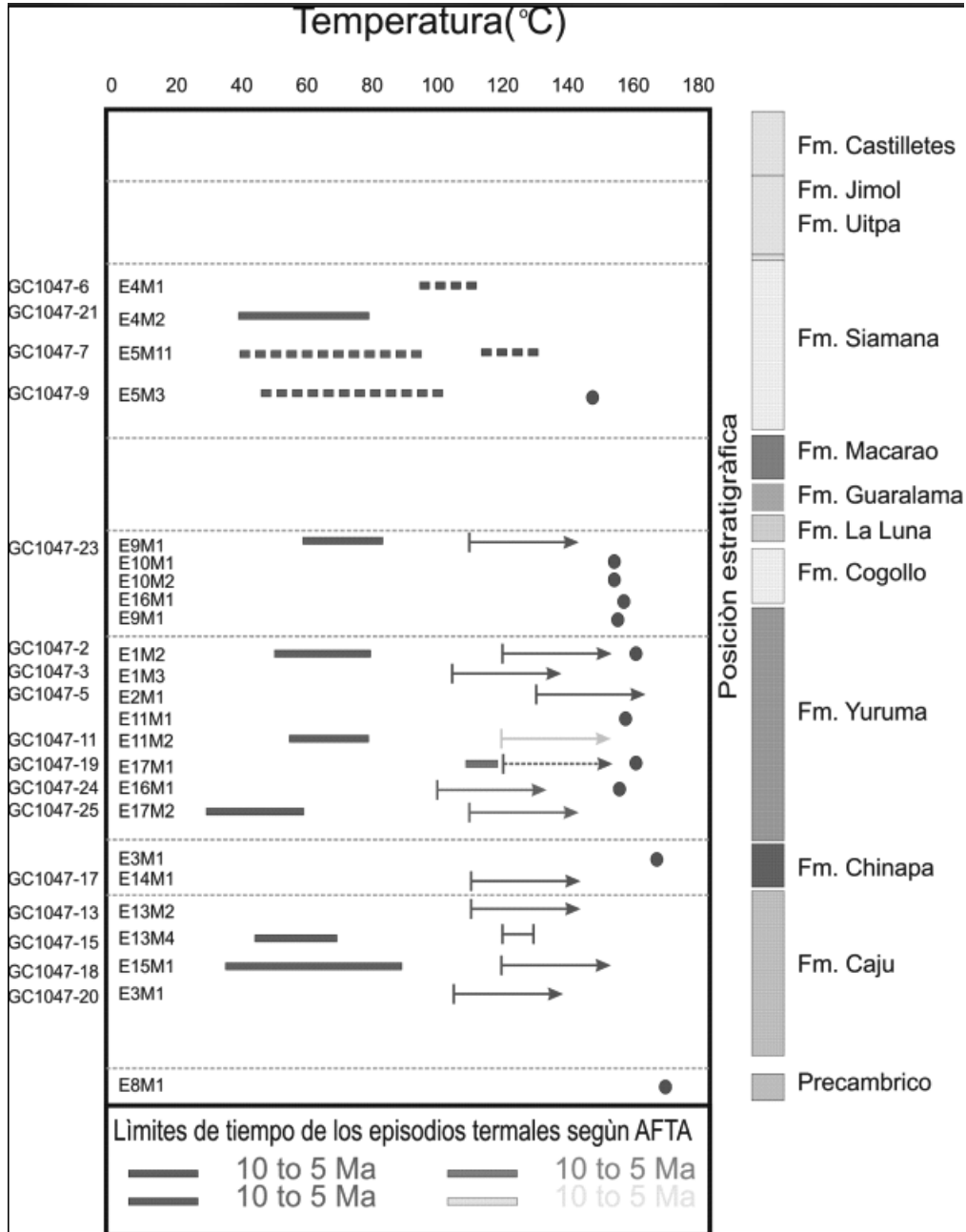


FIGURA 11. Paleotemperaturas para la Subcuenca de la Baja Guajira derivadas de análisis de HFA, HFZ y Ro. Los puntos de color rojo corresponden a temperaturas de Ro. Los resultados se grafican contra la posición estratigráfica relativa de muestras de afloramiento de la Subcuenca de la Baja Guajira, Colombia.

La Figura 12 resume la interpretación de la reconstrucción de la historia termal de la Subcuenca de la Baja Guajira en la cual se determinó la presencia de cuatro eventos termales con las siguientes características:

- 1) El evento termal más antiguo se presentó en el Cretácico Superior entre 95 y 65 Ma, en donde se registra el enfriamiento de 50°C que afectó a las formaciones del Jurásico Superior hasta el Cretácico Superior. La paleo-temperatura máxima registrada en la Formación Cajú es de 155°C.
- 2) El Segundo evento termal se presentó en el Eoceno superior entre 40 a 35 Ma, en donde las formaciones del Jurásico y Cretácico registran un enfriamiento de 30°C, en donde la paleotemperatura máxima registrada durante este evento es de 130°C.
- 3) El tercer evento termal ocurrió en el Mioceno inferior a medio entre 22 a 15 Ma. En donde las formaciones sufrieron un enfriamiento de 30°C, en el cual la paleotemperatura máxima registrada fue de 115°C.
- 4) El cuarto y último evento termal tuvo lugar en el Mioceno superior entre 10 y 5 Ma en donde la secuencia sedimentaria sufre un importante evento de enfriamiento de hasta 70°C. La máxima paleo-temperatura de este evento es de 90°C.

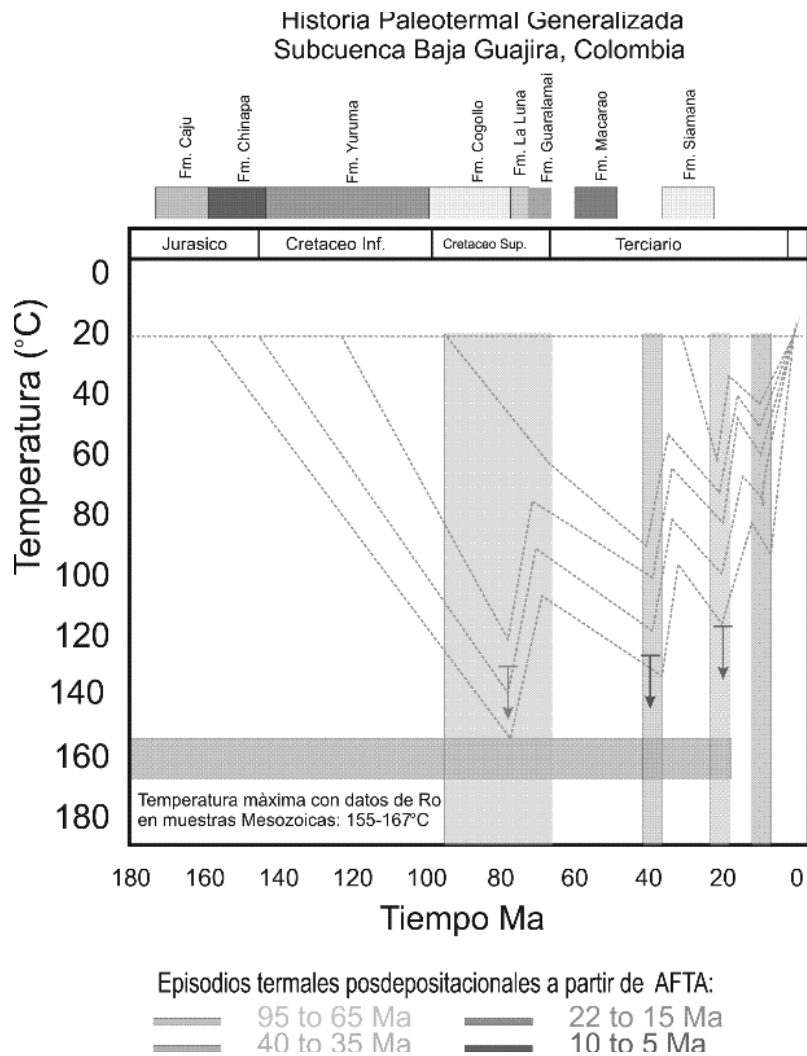


Figura 12. Historia termal generalizada para la Subcuenca de la Baja Guajira basada en los resultados de huellas de fisión en apatitos y zircones, y reflectancia de vitrinita (Ro) de muestras de afloramiento de la Serranía Cosinas.

CONCLUSIONES

La reconstrucción paleotermal de la Subcuenca de la Baja Guajira se obtuvo con base en nuevos análisis de huellas de fisión y de reflectancia de vitrinita, identificándose cuatro eventos termales con las siguientes características:

El evento termal más antiguo se presentó en el Cretácico Superior entre 95 y 65 Ma, en donde se registra un enfriamiento de 50°C que afectó a las formaciones del Jurásico Superior hasta el Cretácico Superior. La paleotemperatura máxima registrada en la Formación Cajú es de 155°C. El Segundo evento termal se presentó en el Eoceno Superior entre 40 a 35 Ma, en donde las formaciones del Jurásico y Cretácico registran un enfriamiento de 30°C en donde la paleotemperatura máxima registrada durante este evento es de 130°C. El tercer evento termal ocurrió en el Mioceno Inferior a medio entre 22 a 15 Ma, en donde las formaciones sufrieron un enfriamiento de 30°C, en el cual la paleotemperatura máxima registrada es de 115°C. El cuarto y último evento termal tuvo lugar en el Mioceno Superior entre 10 y 5 Ma, en donde la secuencia sedimentaria sufre un importante evento de enfriamiento de hasta 70°C. La máxima paleotemperatura de este evento fué de 90°C.

Los eventos termales de enfriamiento coinciden con cuatro discordancias previamente identificadas: 1) la discordancia al tope de la Formación Guaralamai del Cretácico Superior, 2) la discordancia a la base de la Formación Siamana en el Eoceno superior, 3) la discordancia al tope de la Formación Siamana en el Mioceno inferior y medio, y 4) la discordancia al tope de la Formación Castilletes en el Mioceno superior.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Hidrocarburos por la financiación del proyecto 056-2008 Evolución Térmica de la Subcuenca Baja Guajira.

REFERENCIAS

Barrero, D., Aguiar, Y., Robledo, A., Hernandez, C., Martinez, J., Rojas, O., Valencia, E., Álvarez, M. Y Ojeda, Y., 2005- 2006. High potential lightly explored basin, Onshore Guajira Basin. ANH, Bogotá.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. Y Martinez, J., 2007. Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. ANH, Bogotá.

Brigaud, F. Chapman, D. Y Le Douaran, S., 1990. Estimating thermal conductivity in sedimentary basins using lithologic data and geophysical well logs. AAPG Bulletin, 74: 1459–1477.

Burnham, A. K. Y Sweeney, J., 1989. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53.

Cardona, A., Weber, M., Wilson, R., Cordani, U., Muñoz, C. M. Y Paniagua, F., 2007. Evolución tectono-magmática de las rocas maficas-ultramáficas del Cabo de La Vela y el Stock de Parashi, Península de La Guajira: registro de la evolución orogénica Cretácica-Eocena del norte de Suramérica y el Caribe. XI Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, Agosto 14-17.

Escalante, C. E., 2006. Seismic Stratigraphy of the Tayrona Depression-Offshore Baja Guajira Basin, Colombia. *ECOPETROL*, Bogotá, Colombia: 13.

García-González, M., Cruz-Guevara, L.C., Mier-Umaña, R., et. al., (2009). Evolución Térmica De La Subcuenca De La Baja Guajira. Informe interno N° 56 de 2008 UIS-ANH, en: www.anh.gov.co

Gleadow, A.J.W., Duddy, I.R., And Lovering, J.F. (1983), Fission Track Análisis: A New Tool For The Evaluation Of Termal Histories And Hydrocarbon Potencial. *APEA J*, 23, 93.102

Gómez, J., Nivia, A., Montes, N., Jiménez, D., Sepúlveda, M., Gaona, T., Osorio, J., Diederix, H., Mora, M., Y Velásquez, M., 2007 a. Atlas Geológico de Colombia, plancha 5-01, Escala 1: 500.000, INGEOMINAS.

Green, P.F., Duddy, I.R., Gleadow, A.J.W. And Lovering, J.F. (1989) Apatite Fission Track Analysis As A Paleotemperature Indicator Fro Hydrocarbon Exploration, In Naeser N.D. And Mcculloh, T. (Eds), *Thermal Hystory Of Sedimentary Bains – Methods And Case Histories*, Springer-Verlag, New York, 181-195.

Mercado, M., 2003. Mapa Geológico del Departamento de La Guajira, Escala 1:250000. Memoria Explicativa, INGEOMINAS.

Pulido, O., Castro, E., López, G. Y Cristancho, J., 1991. Compilación y análisis de la información de la Subcuenca de la Baja Guajira. ECOPETROL, informe interno 2303.

Raasveldt, H. C., 1963. Mapa geológico de las planchas A-14, A-15, A-16, B-14, B-15 Guajira. Serv. Geol. Nal.
Ramírez, V., 2006. Geological Setting and Hydrocarbon Guajira Basin, Offshore Northern. Poster presentation at AAPG Annual Convention, Houston, Texas, April 9-12.

Rodríguez, G. Y Londoño. A., 2002. Memorias del mapa geológico del Departamento de La Guajira, Geología, recursos minerales y amenazas potenciales. INGEOMINAS.

Rubio, R., Ramírez, V., Rubiano, J., Garnica, M., Moreno, N., Plata, J., Mantilla, M., Gatsby., E., López, O., Martínez, I., Zegarra, M., Díaz, O. Y Meza, J., 1998. Evaluación regional, Cuenca de la Baja Guajira. Informe final. Vicepresidencia adjunta de exploración gerencia de estudios regionales. Informe interno, Ecopetrol.

Vence, E., 2008. Subsurface structure, stratigraphy, and regional tectonic controls of the Guajira margin of northern Colombia. Thesis Master of Science in Geological Sciences, University of Texas at Austin, 128 p.

Trabajo recibido: Abril 22 de 2010
Trabajo aceptado: Noviembre 2 de 2010

