



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revencyt
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Hacia los 130 años de creación de la Universidad del Zulia

"Buscar la verdad y afianzar los valores trascendentales", misión de las universidades en su artículo primero, inspirado en los principios humanísticos. Ley de Universidades 8 de septiembre de 1970.

1D Basin Modeling of crude oil Generation And Expulsion in the Urdaneta oeste field, Maracaibo lake Basin, Venezuela

Díaz González, José G.¹ , Escobar Navarro, Marcos E.^{2,3} 

¹PDVSA-Maracaibo-Exploración Occidente, Edif. Exploración y Producción. Av. 5 Julio Maracaibo 4002, Venezuela.

²Postgrado de Geología Petrolera, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo 4002A, Venezuela.

³CARBOZULIA, Av. 2, No. 55-185, Casa Mene Grande, Maracaibo 4002, Venezuela.

<https://doi.org/10.22209/rt.v43n2a05>

*Autor de Contacto: diazjgt@pdvsa.com, escomar24@gmail.com

Recepción: 23/05/2019 | Aceptación: 17/03/2020 | Publicación: 01/05/2020

Abstract

The main purpose of this research was to evaluate the opportunities for exploration located in the Urdaneta Oeste field on the west coast of the Maracaibo Lake, Venezuela. With this purpose, a 1D basin modeling was carried out in order to simulate the processes of crude oil generation and expulsion. The objectives includes; determining and quantifying the geological and geophysical data to support the basin modeling; and defining the times of petroleum generation and expulsion from their source rocks. Basin Mod application was used for this purpose. As a result of the 1D geochemical modeling, four exploratory opportunities located northwest of Urdaneta Oeste fault (hanging wall) and on the whole eastern flank of Urdaneta Este fault (hanging wall) were defined, named Urd-1, Urd-2, Urd-3 and Urd-4 on Cretaceous formations Rio Negro, Apón and Socuy Member levels where the oil generation and expulsion conditions were favorable.

Keywords: 1D Basin modeling; Urdaneta Oeste field; Cretaceous; Maracaibo lake; Exploratory opportunities.

Modelado de cuenca 1D de generación y expulsión de petróleo en el campo Urdaneta Oeste Lago, Cuenca del Lago de Maracaibo, Venezuela

Resumen

Se evaluaron las oportunidades exploratorias ubicadas en el campo Urdaneta Oeste, costa occidental del lago de Maracaibo, Venezuela. Para ello, fue realizado el modelado de cuenca 1D, el cual simula los procesos de generación y expulsión de petróleo. Entre los objetivos propuestos se mencionan, determinar y cuantificar los datos geológicos y geofísicos para sustentar el modelado de cuenca, y establecer los tiempos de generación y expulsión del petróleo desde la roca madre. Para ello, se utilizó la aplicación Basin Mod. Como consecuencia del modelado geoquímico 1D, se determinaron cuatro oportunidades exploratorias localizadas en la zona noreste (bloque levantado) de la falla Urdaneta Oeste y todo el flanco este (bloque levantado) de la falla Urdaneta Este, denominadas Urd-1, Urd-2, Urd-3 y Urd-4, ubicadas a nivel de las formaciones cretáceas Apón, Río Negro y el Miembro Socuy de la Formación Colón, identificándose condiciones favorables para la generación y expulsión de hidrocarburos.

Palabras Clave: Modelado de cuenca 1D; Campo Urdaneta Oeste; Cretáceo; lago de Maracaibo; Oportunidades exploratorias.

Introducción

El modelado geoquímico consiste en un conjunto de métodos que aplican algoritmos matemáticos a datos geoquímicos, geológicos y geofísicos con la finalidad de reconstruir la historia de una cuenca y así determinar, si en el pasado, se dieron las condiciones para la formación de un sistema petrolero [1-2]. El Cretáceo en la costa occidental del lago de Maracaibo, específicamente en el campo Urdaneta Oeste (Figura 1), representa una importante oportunidad de negocios para la industria petrolera. En épocas anteriores, los objetivos exploratorios de este campo y otros cercanos, se orientaron hacia la explotación del petróleo presente en areniscas de la Formación Misoa del Eoceno [3-5], consiguiendo en la mayoría de los casos volúmenes de producción rentables en estos yacimientos maduros. Por su parte, la necesidad de contar con nuevas reservas de crudos livianos y medios, ha hecho del Cretáceo un horizonte esencial en cuanto a la definición de prospectos de hidrocarburos, y la planificación de las actividades para su exploración [6].

Vista la carestía de estudios concluyentes en tal sentido para el campo Urdaneta Oeste [7-9], se propuso la aplicación en este yacimiento, del modelaje de cuencas en una dimensión (1D), utilizando el software *Basin Mod* (versión 11.0) en tres pozos (X, Y y Z), ubicados en el área de estudio (Figura 1). El modelado 1D proporciona información de los tiempos de generación y expulsión de petróleo, además de los tipos de hidrocarburos generados (líquidos y/o gaseosos) [2] y la tasa de transformación, la cual depende del tipo de kerógeno y la madurez térmica [10]. Este ejercicio no solo disminuyó la incertidumbre exploratoria, sino que condujo a proponer cuatro nuevos prospectos exploratorios para el campo evaluado.

Marco Geológico

Las principales rocas madres de petróleo en el área de estudio, son la Formación La Luna y, en menor extensión, el Miembro Machiques de la Formación Apón (ambas del Cretáceo) [11], aunque otras unidades podrían generar petróleo en mucha menor proporción [12]. Otros campos petroleros en el sector occidental del Lago de Maracaibo, tales como Urdaneta Oeste, García, Ambrosio, Alturitas, Alpuf y Boscán-Los Claros, poseen sus principales acumulaciones de petróleo en areniscas fluvio-deltáicas de la Formación Misoa (Eoceno), y calizas del Grupo Cogollo (Cretáceo) [13]. La Figura 1, mapa de ubicación de los pozos, incluye la columna estratigráfica, los elementos del sistema petrolero y un marco tectónico simplificado. Un resumen de la estratigrafía de la zona de trabajo, y la evolución tectónica de la Cuenca del lago de Maracaibo, pueden ser revisados en Díaz [14].

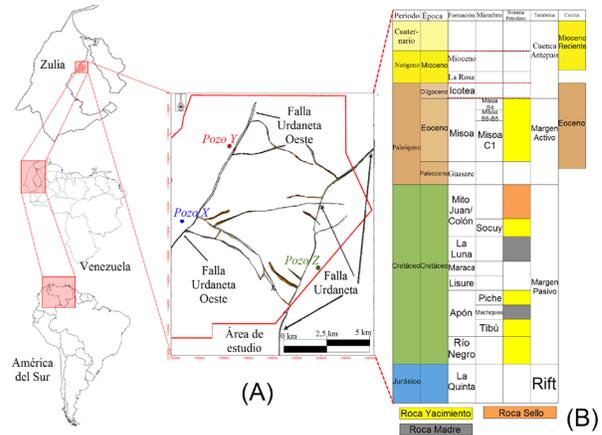


Figura 1. Área de estudio. (A) Ubicación de los pozos X, Y, Z y fallas principales, Urdaneta Oeste y Urdaneta. (B) Columna estratigráfica para el Cretáceo y Terciario, elementos del sistema petrolero, y situación tectónica temporal, simplificada.

Los dos principales elementos estructurales que afectan el área de estudio (Figura 2) son, la falla inversa-transcurrente sinistral Urdaneta Oeste como estructura principal, con dirección N45°E, divide al campo Urdaneta en dos bloques, uno elevado hacia el NO y el otro deprimido hacia el SE; y la falla Urdaneta (también llamada Urdaneta Este), una extensa falla transpresiva sinistral de orientación N30°E y alto ángulo de buzamiento hacia el SE, cuyo salto estructural disminuye hacia el norte [15-16]. En el bloque elevado se encuentra el anticlinal Urdaneta, limitado al SE por la falla Urdaneta Oeste, con fallado normal hacia la cresta; el bloque deprimido muestra un monoclinial con buzamiento hacia el SE en las formaciones Río Negro, La Luna y Colón (Cretáceo) mientras que para la discordancia eocena, se observó un cambio en la dirección del buzamiento hacia el SO [15-16], lo que se atribuye al basculamiento de la cuenca producido por el levantamiento de la Cordillera Andina y la Serranía de Perijá, en el Mioceno [17-18]. En la Figura 2, se observa sobre el bloque deprimido, el corredor de fracturas y el denominado «Boomerang de Gamarra», representando áreas favorables para la acumulación de hidrocarburos en las calizas del Cretáceo [19]. Las interpretaciones sísmicas 3D de la geometría y secuencia de estructuras en el bloque Urdaneta Oeste [15-16], en términos de las elucidaciones de los cubos sísmicos tomados en esta área, fortalecieron la postulación de nuevos prospectos exploratorios, en función de los resultados del modelaje 1D, que serán descritos a continuación.



Figura 2. Estructura del campo Urdaneta Oeste. Incluye fallas principales, bloques levantado y deprimido, áreas prospectivas, y ubicación de pozos X, Y y Z.

Metodología

El modelado 1D requiere de datos provenientes de la literatura geológica regional [11, 17-18, 20] y local [14-16], información de perforaciones, perfiles de pozos y datos sísmicos [14-16]. El análisis apropiado del arreglo geométrico secuencial de los estratos de rocas y de su cronostratigrafía, constituye la base para el establecimiento de una secuencia de edades para los más importantes eventos geológicos durante la evolución de la Cuenca del lago de Maracaibo, incluyendo deposición, no deposición, levantamiento y erosión [11, 17-18, 20]. El modelo geológico resultante, fue incorporado a la aplicación *Basin Mod*.

El dato geoquímico más relevante para el modelo 1D es la presencia de rocas madres efectivas, incluyendo la cantidad, tipo de kerógeno, y su nivel de madurez térmica [21]. La roca generadora más importante en la cuenca [12, 22-23], es la Formación La Luna del Cretáceo. Para la evaluación de las rocas madres prospectivas, y construcción de diagramas de variación de información geoquímica respecto a la profundidad, se tomaron muestras de ripios, núcleos de perforación y de pared del Eoceno, Paleoceno y Cretáceo en los pozos X, Y y Z, las cuales fueron analizadas a fin de determinar cantidad, calidad y madurez térmica de la materia orgánica, información a incorporar en la aplicación *Basin Mod* para realizar el modelado 1D. Una alícuota de cada muestra de roca fue pulverizada en un equipo *Shatterbox* a unas 100 mallas (105 μm). Las determinaciones analíticas incluyeron mediciones de Carbono Orgánico Total (COT) en un analizador de carbono Leco C-230 [14]; pirólisis anhidra en un equipo Rock-Eval [24], modelo 6, y petrografía orgánica en un microscopio Zeiss modelo Axio Imager A1, para las mediciones de la Reflectancia de la Vitrinita (%Ro; norma ASTM D 2798-05 [25]). Los parámetros cinéticos que se utilizaron para simular los procesos de generación de hidrocarburos, fueron los establecidos en la lista de referencia de *Platte River Associates, Inc.* (software *Basin Mod* utilizado), seleccionando kerógeno tipo II, cuyas propiedades se ajustan bastante bien a las características de la Formación La Luna [26].

La reconstrucción de la historia térmica del área de estudio, fue realizada considerando, inicialmente, la variabilidad de flujo de calor asociado a los distintos tipos de cuencas sedimentarias, referenciados de Allen y Allen [27], para adaptarlos a los eventos tectónicos relacionados a la formación de la Cuenca del lago de Maracaibo (Tabla 1), y de esta manera, obtener el estimado de flujo de calor real. La información resultante de la aplicación del modelo, fue calibrada con las determinaciones del gradiente geotérmico del área de estudio [28], construidas sobre la base de temperaturas de superficie y de fondo de pozo, para perforaciones tanto en el campo Urdaneta Oeste, como en otros yacimientos cercanos. La historia térmica fue presentada en forma de gráficas de profundidad respecto al grado de madurez térmica del kerógeno presente en las rocas madres, expresada en valores calculados de %Ro (%Ro^{calc}) generados por la aplicación *Basin Mod*, y a su vez contrastados con los resultados de %Ro determinados sobre las formaciones geológicas objeto de estudio.

Tabla 1. Secuencia y evento tectónico asociados al flujo de calor adaptado a la formación de la Cuenca del lago de Maracaibo. Datos tomados de Allen y Allen [27].

Secuencia	Evento tectónico	Promedio de Flujo de Calor (mW/m ²)
Jurásica	Extensión	> 85
Cretácea	Margen pasivo	50
Cretácea tardía-Paleocena	Transición de margen pasivo a margen activo	50-80
Paleocena tardía-Oligoceno-Neógena.	Cuencas colisionales	70

Los diagramas de soterramiento [29] permitieron realizar interpretaciones acerca de la historia depositacional, incluyendo tasa de sedimentación, cantidad de levantamiento y subsidencia. Con los datos litológicos, se calcularon las correcciones de la compactación de los sedimentos y el flujo de calor. Además, las litologías son representadas sobre este diagrama [1-2].

Resultados y discusión

Esta sección incluye la presentación y discusión de los resultados del modelado geoquímico 1D. Se inicia con las calibraciones térmicas de los pozos X, Y y Z, presentadas como gráficos de profundidad respecto a madurez térmica de la Formación La Luna (Figura 3), en valores de %Ro^{calc}. Los cambios de pendiente observados en las curvas de sedimentación, obedecen a los fenómenos geológicos que influyeron en el modelado de la cuenca, tales como los espesores erosionados [6], el comportamiento de las fallas Urdaneta Oeste y Urdaneta Este [15-16], y la secuencia de eventos tectónicos que dominaron la evolución de la cuenca [17-18]. Resultados de %Ro^{calc} entre 0,62 y 0,73, para las rocas madres de la Formación La Luna en el pozo X, indican un nivel de madurez térmica en la parte inicial de la ventana de petróleo [30], coincidiendo con lo presentado en las gráficas de calibración térmica del pozo X para la Formación La Luna. El pozo Y se ubica en ma-

durez tardía, con $\%Ro^{calc}$ entre 0,53 y 0,90 (finales de la ventana del petróleo) y el pozo Z, entre 1,10 y 1,40 (generación de gas húmedo).

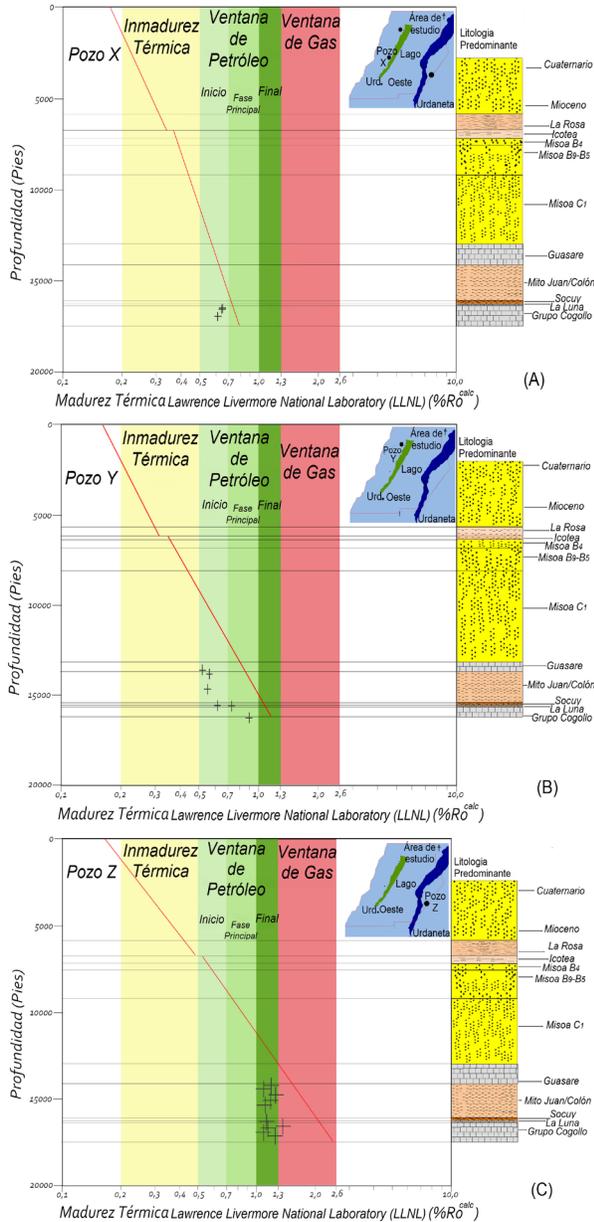


Figura 3. Calibración térmica de los pozos X, Y y Z.

Las franjas de colores indican distintos niveles de maduración térmica, explicados en la correspondiente leyenda. La barra lateral derecha, corresponde a la columna litoestratigráfica del pozo, con la litología predominante para cada unidad geológica, y el recuadro de fondo azul, muestra la ubicación de cada pozo en una sección areal del campo Urdaneta Oeste.

Adicionalmente, se presenta un mapa que muestra las curvas de isogradientes geotérmicos (Figura 4), para el área de estudio. Los valores oscilan entre 24,5°C/km y 21,2°C/km, con una tendencia de incremento en dirección SO - NE. La colisión oblicua en el Paleógeno entre las placas del Caribe y América del Sur, con un soterramiento progresivo de la región noreste de la cuenca, causado por la carga litostática [17,18] ocasionó un efecto de sobrepresión, principalmente sobre las lutitas de la Formación Colón [12]. Aparte, la mayor temperatura, propició la primera etapa de generación, expulsión, migración y acumulación de hidrocarburos (cocina) sobre las rocas madres de la Formación La Luna [12, 23]. La presencia progresiva de nuevos fluidos, con la profundización de la cuenca en dirección SO-NE, produjo una disminución gradual de la conductividad térmica de las rocas, con el consecuente incremento en el gradiente geotérmico [32], en esta misma dirección, para un flujo de calor con pocas variaciones laterales, en el área de estudio [14], y en la cuenca en general [12].

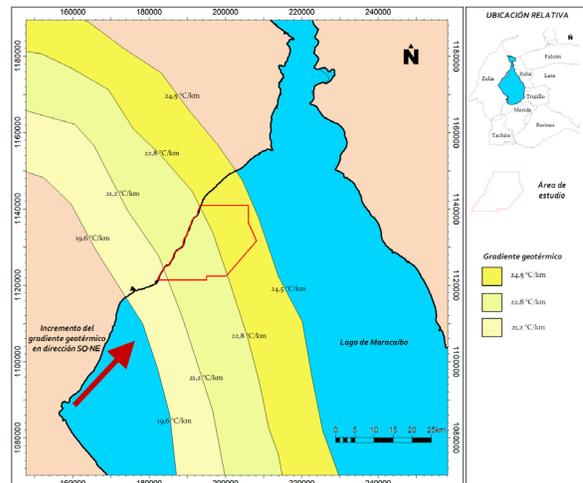


Figura 4. Mapa de curvas de isogrante geotérmico, en unidades de °C/km, campo Urdaneta Oeste y regiones adyacentes.

Seguido, se presentan los diagramas de soterramiento, profundidad respecto a edad geológica, para los pozos X, Y y Z (Figura 5). Las curvas para cada unidad presente en la columna litoestratigráfica, permiten visualizar la evolución geológica de la cuenca para las perforaciones consideradas en el modelado. Pendientes normales, reflejan la velocidad de sedimentación y subsidencia (a mayor inclinación, mayor tasa de sedimentación), mientras que aquellas inversas, evidencian procesos de levantamiento y erosión.

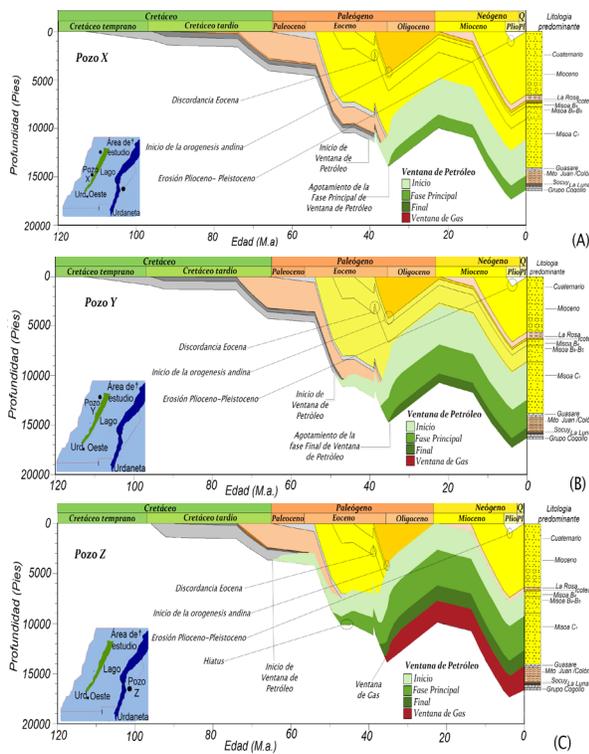
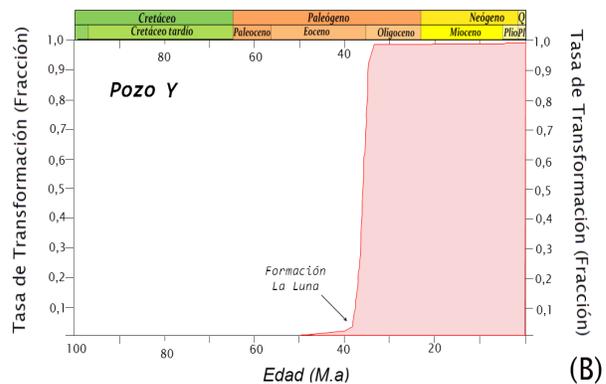
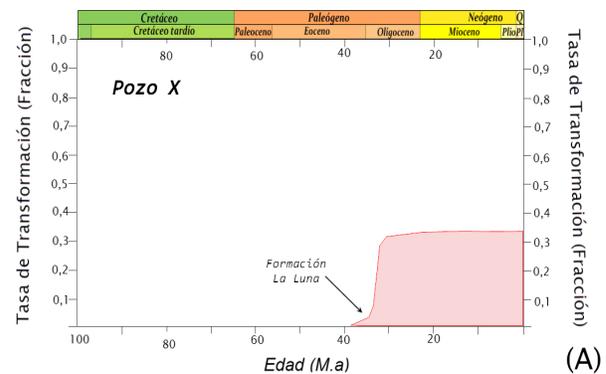


Figura 5. Diagramas de soterramiento, pozos X, Y y Z. Símbolos en la barra lateral derecha y en el recuadro de fondo azul, ver Figura 3.

Al inicio, curvas de baja pendiente para la secuencia cretácica reflejan sedimentación en un régimen tectónico de margen pasivo [17-18]. El incremento de la inclinación, registrado a finales del Cretáceo y el Paleoceno, implica transición progresiva a una situación tectónica de cuenca de retroarco [17-18]. A comienzos del Eoceno, las curvas permiten apreciar un evento de profundización importante de la cuenca. Esto ocurre en el sentido NE [17-18], debido a la colisión oblicua de la Placa del Caribe sobre América del Sur, resultando en el primer gran evento de generación de petróleo (cocina) para la Formación La Luna, durante el Eoceno temprano - medio [6, 12, 26], reforzado a finales del Eoceno medio por el emplazamiento de las Napas de Lara. El rebote isostático de la cuenca por el avance hacia el Este de la Placa del Caribe, durante el Eoceno tardío [17-18], ocasionó un evento de erosión o no depositación de carácter regional, con cambio en el sentido de la pendiente de las curvas, en dirección ascendente, durante el Oligoceno, en la región bajo estudio. La sedimentación se reinicia a comienzos del Mioceno, bajo un régimen tectónico de cuenca de antepaís, pero a mediados de este periodo, un fuerte incremento en las pendientes de las curvas, reflejando un

nuevo basculamiento de la cuenca con hundimiento en dirección SO (antefosa andina [17-18]), es el resultado del levantamiento progresivo de Los Andes de Mérida [17-18]. Este evento de soterramiento, promueve la segunda cocina de hidrocarburos para las rocas madres de la Formación La Luna, comenzando en la región SO, y extendiéndose progresivamente hacia el norte hasta el Reciente [12]. Estos diagramas también exhiben las etapas de madurez térmica para la Formación La Luna, alcanzadas en los pozos modelados. Se destaca que el X se encuentra en una etapa inicial de ventana de petróleo, el Y en ventana tardía y el Z en generación de gas húmedo. Estos resultados coinciden con los de la calibración térmica, para los pozos analizados.

El siguiente resultado a discutir, consiste en las gráficas de tasa de transformación de la materia orgánica de la Formación La Luna en petróleo, respecto a la edad geológica, para los tres pozos (Figura 6). Todas las curvas de transformación se inician a finales del Eoceno/principios del Oligoceno, consecuencia de la primera cocina de la Formación La Luna en la Cuenca del lago de Maracaibo [4, 12, 17-18, 22]; la Figura 6 permite reconocer que los pozos Y y Z alcanzaron un 99% y 100% de transformación de kerógeno en petróleo, respectivamente, mientras el pozo X alcanzó sólo un 35% aproximadamente.



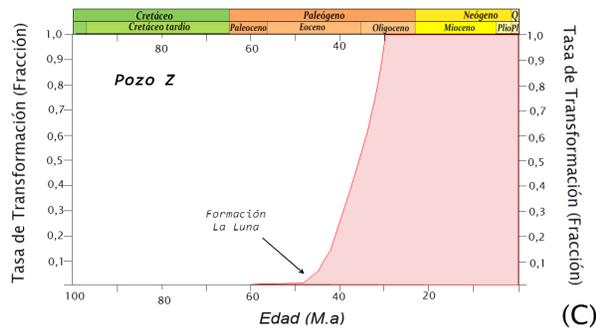
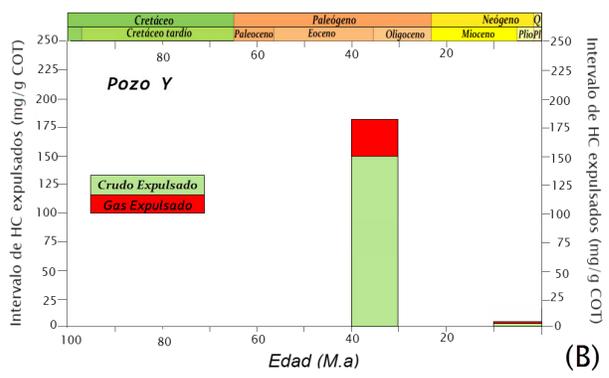
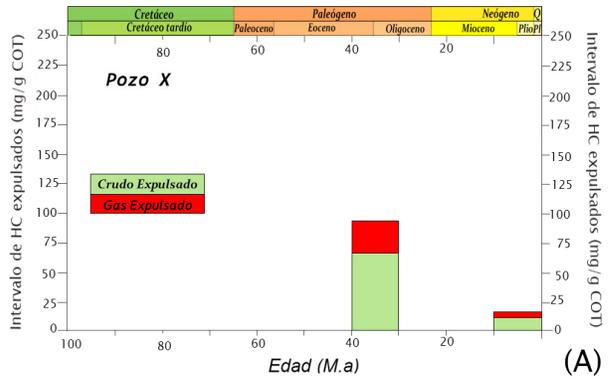


Figura 6. Tasa de transformación del kerógeno para los pozos X, Y y Z respecto a la edad geológica. Se muestra el punto de inicio para la ventana del petróleo en la Fm. La Luna.

En este caso, la ubicación de los pozos (Figura 1) es clave. El pozo X se encuentra en la región suroeste del bloque levantado de la falla Urdaneta Oeste. En esta parte del campo, la falla Urdaneta Oeste va perdiendo salto, reflejándose una menor influencia del evento tectónico (interacción entre placas del Caribe y América del Sur) asociado a la cocina eocena de las rocas madres de la Formación La Luna [4, 12, 17-18, 22]; por otra parte, el gradiente geotérmico va reduciendo su valor en esa misma dirección (Figura 4), lo cual disminuiría la temperatura de transformación del kerógeno en petróleo. En contraposición, el pozo Y se ubica en la región noroeste del campo, a unos 11 km del bloque levantado de la falla Urdaneta Este, y el pozo Z se localiza en el sureste del bloque levantado de la falla Urdaneta Este. Los pozos Y y Z están más cercanos al proceso regional de maduración térmica y generación de crudo y gas (ventana del petróleo [30]) de la Formación La Luna. Los cálculos de madurez-TTI (Índice de tiempo-temperatura [28]) presentados por Talukdar *et al.* [12], permitieron concluir que ninguna roca madre post-Jurásica ubicada dentro del área de drenaje de la cuenca, alcanzó suficiente madurez térmica como para poder generar petróleo antes del Eoceno. El modelado 1D permitió determinar los volúmenes de crudo y gas generados por las rocas madres de la Formación la Luna, para los tres pozos objeto de estudio. Los valores de los parámetros geoquímicos empleados en el cálculo (índices de hidrógeno y COT originales y presentes, eficiencia de expulsión), fueron tomados de Talukdar y Marcano [33]. Para el pozo X, el modelo arrojó volúmenes calculados de crudo, de 54.300 l/ha*m de roca (41 bbls/acre*pies de roca), y de gas, 8,35 metros³/ ha*m de roca (36 pies³/ acre*pies de roca), lo cual coincide con el hecho de que este pozo presentó los menores valores de tasa de transformación de kerógeno, y de %Ro^{calc}, con respecto a los restantes pozos modelados. Para los pozos Y y Z se logró, de crudo, 178.880 y 194.780 l/ha*m de roca (135

y 147 bbls/acre*pies de roca), respectivamente, y de gas, 37,14 y 55,71 metros³/ ha*m de roca (160 y 240 pies³/ acre*pies de roca). Se ratifican las diferencias existentes de generación de petróleo, entre las áreas afectadas por la falla Urdaneta Oeste (pozo X), respecto al noreste de la falla Urdaneta Oeste (pozo Y) y el suroeste de la falla Urdaneta Este (pozo Z).

Para cerrar, el modelado geoquímico 1D aportó el momento geológico de la expulsión de petróleo y las cantidades de hidrocarburos líquidos y gaseosos que abandonaron la roca madre, expresados en unidades de mg/g COT. Debido a que las tasas de transformación del kerógeno de la Formación La Luna en los pozos Y y Z durante la primera cocina eocena, corresponden aproximadamente al 100% (Figura 7), lo cual representa la cantidad de hidrocarburos expulsados respecto a la edad geológica (millones de años) para cada pozo, se observa un único pulso de expulsión de crudo y gas a finales del Eoceno. Como para el pozo X solamente hubo generación limitada de crudo y gas durante el Eoceno, su gráfica (Figura 7A) permite ver una segunda barra con valores de crudo y gas expulsados durante la cocina Mioceno-Reciente, resultado consistente con la historia del sistema petrolero para la Cuenca del lago de Maracaibo [4, 12, 17-18, 22].



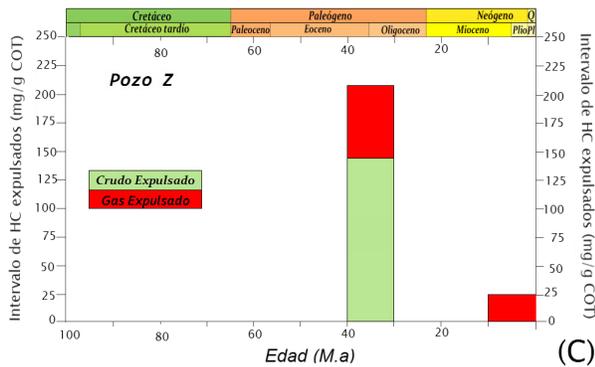


Figura 7. Edad de expulsión de petróleo y cantidad de hidrocarburos generados, para las rocas madres de la Formación la Luna en el área de influencia de los pozos X, Y y Z.

Para finalizar, fueron propuestas cuatro oportunidades exploratorias denominadas Urd-1, Urd-2, Urd-3 y Urd-4 (Figura 8), sobre la base de las siguientes evidencias: 1. El modelado geoquímico 1D, en términos de los resultados de generación de petróleo y tasas de transformación del kerógeno; 2. El comportamiento de producción en yacimientos cretáceos cercanos (Empresa Mixta Petroregional del Lago, por ejemplo, ubicada al sur), lo cual podría brindar una volumetría atractiva; 3. La geología estructural del área de estudio; los prospectos son delimitados por fallas que cierran por buzamiento natural; las trampas que están en el pasillo (bloque deprimido) de las fallas inversas Urdaneta Este y Urdaneta Oeste se presentan buzamiento arriba, lo cual favorece el llenado de yacimientos; y, 4. El fallamiento inverso produce, en algunas zonas del área de estudio, el llenado de yacimientos infrayacentes desde el punto de vista estratigráfico.

Estas cuatro oportunidades exploratorias se ubican justamente en zonas alrededor de los pozos modelados, específicamente en las zonas de fracturas aledañas a las fallas Urdaneta Oeste y Urdaneta (Este), las cuales se comportarían como depósitos del tipo *sweet spots* en las rocas calcáreas cretácicas [19]. Luego, toda la información se procesa en la aplicación especializada GAEAPAS (*Geologic Analysis Exploration and Prospect Appraisal System*), como apoyo en la cuantificación de las expectativas que pueda ofrecer el prospecto específico.

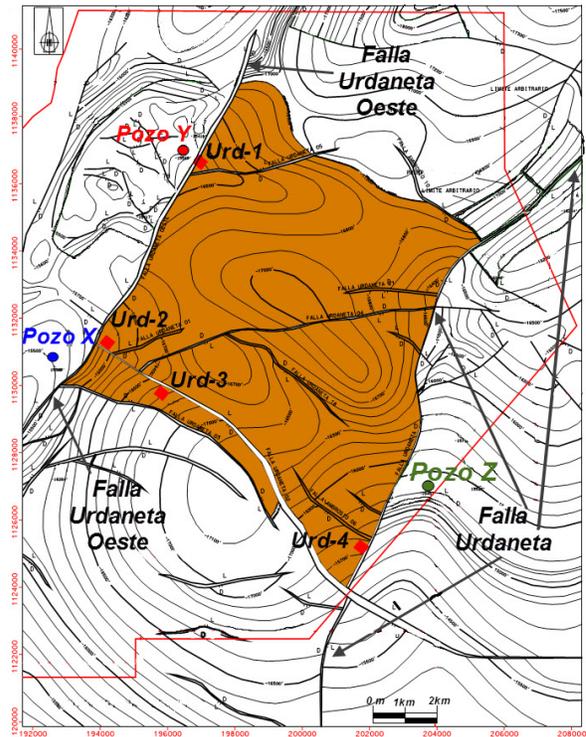


Figura 8. Mapa estructural al tope de las calizas del Cretáceo, mostrando las localizaciones de las cuatro oportunidades exploratorias, denominadas prospectos Urd-1 al 4. Modificado de PGP- Urdaneta Oeste, 2019 [31].

Conclusiones

El modelo 1D de génesis y expulsión de hidrocarburos para el kerógeno contenido en las rocas madres cretáceas objeto de evaluación en los pozos modelados, evidencia que se alcanzó una etapa principal de generación, migración y acumulación de petróleo, para la Formación La Luna, a partir del Eoceno temprano a medio. Estas rocas madres resultaron estar en un nivel de madurez térmica entre inicio de la ventana de petróleo y generación de gas húmedo. Las tasas de transformación del kerógeno en petróleo para los pozos Y y Z, alcanzaron valores de 90 y 100% durante el Eoceno medio-tardío. En el pozo X, se evidenció un porcentaje de transformación del 30% como resultado de la cocina eocena, pero se registró

evidencias del segundo evento de generación y expulsión de crudo y gas, durante la cocina del Mioceno-Reciente. El Gradiente Geotérmico del área de estudio varió entre 24,5 °C/km y 21,2 °C/km, con una tendencia de incremento en dirección SO - NE. Finalmente, los resultados obtenidos y las evidencias recabadas de la literatura, permitieron proponer cuatro nuevas oportunidades exploratorias, denominadas Urd-1, Urd-2, Urd-3 y Urd-4, lo cual rompe los esquemas tradicionales en la exploración de petróleo, debido a la propuesta de ubicación de localizaciones en el bloque deprimido (graben), es decir, el pasillo en medio de las fallas Urdaneta Oeste y Urdaneta Este, y no en los bloques levantados (horst) de las fallas mencionadas (Figuras 2 y 8) [7-9].

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de los profesionales: Intérprete Sísmico Carlos Vargas, Geólogo Omar Montilla, Sedimentólogo Edwin Valbuena, Analista Técnico Zamer El Debl, Ing. de Yacimientos María Angarita, Petrofísico Flexner Luzardo, todos de la Gerencia de Proyectos Exploratorios Occidente de PDVSA, así como la de los expertos que participaron en el proceso de revisión del artículo, por brindar excelentes sugerencias y recomendaciones que mejoraron de modo importante su calidad y contenido.

Referencias Bibliográficas

- [1] Al-Hajeri M.M., Al Saeed M., Derks J., Fuchs T, Hantschel T, Kawerauf F, Neumaier M., Schenk O., Swientek O., Tessen N., Welte D., Wygrala B., Kornpohl D. and Peters K.: Basin modeling and petroleum system. *Oilfield Review*, Vol. 21, No. 2 (2009) 16-33.
- [2] Waples D.W.: Maturity modeling: Thermal indicators, hydrocarbon generation, and oil cracking. In: L.B. Magoon and W.G. Dow, eds. *The Petroleum System-From Source to Trap*. AAPG Memoir 60, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa (1994) 285-306.
- [3] Jaimes K.J.: Libro de Ubicación Geográfica de Yacimientos y Prospectos PDVSA OCCIDENTE 2012. PDVSA, Maracaibo, Gerencia de Reservas de Estudios Integrados de Occidente, Informe RES-OCC-2013,00148, 2013.
- [4] Ghosh S., Petsman P, Zambrano E., Meléndez L., Bartok P, Lorente M., Pitelli R., Rull V., Durán I., Mompert L., White C., Domínguez C., Oropeza S., Travaglio F, Quintana M. y Villarroel J.: Síntesis Geológica, Marco Secuencial y Perspectivas Exploratorias del Eoceno de la Cuenca de Maracaibo. Grupo ESTEX, MARAVEN, S.A., Maracaibo, Informe N° EPC 13494, 1995.
- [5] Alberdi M. and Gallango O.: *Geochemical Analysis of Source Rocks and Crude Oils in Urdaneta West*. INTEVEP S.A., Los Teques, Informe INT-STE-00154,96, 1996.
- [6] Audemard F, Hernández G., Lilliu A., Azpirtzaga I., Bejarano C., Cabrera E., Del Castillo H., De Toni B., Di Croce J., Duerto L., Ferrer B., Jaimes M., Márquez X., Violino R., Ysaccis R., Alvarez M., Bolívar F., Cantisano M., Olivares C., Petit P., Pinzón O., Santiago N., Serrano I., Taylhardat V., Truskowski I., Vera P., Coriat R., Giral W. y Gómez M.: *Visión Integrada del Potencial Petrolífero de Venezuela (VIPA)*. PDVSA-Exploración. Caracas, 2000.
- [7] Olivares C.: *Identificación y Validación de Oportunidades Exploratorias en el Noroeste del Área del Lago de Maracaibo – Proyecto Zulia Occidental*, Venezuela. PDVSA, Caracas, Proyectos Exploratorios y de Delineación, 2010.
- [8] Méndez J., Wilchy R. y Reyes D.: *Campo Urdaneta Oeste, Sedimentología, Reservorios y Zonas de Producción de Hidrocarburos. Origen de las Porosidades y Unidades de Flujo*. PETROREGIONAL DEL LAGO. Maracaibo, Informe A11.02.00-15-RP64, 2011.
- [9] Montilla O.J.: *Modelo Estructural para el Cretácico de la Costa Occidental del Lago de Maracaibo*. La Universidad del Zulia, Postgrado en Geología Petrolera, Trabajo Especial de Grado de Maestría, 2018.
- [10] Ratnayake A., Kularathne C. and Sampei Y.: Assessment of hydrocarbon generation potencial and thermal maturity of the offshore Mannar Basin, Sri Lanka. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Vol. 8, No. 3 (2018) 641-654.
- [11] González de Juana C., Iturralde de Arozena J. y Picard X.: *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas, Volumen I y II*. Ediciones Foninves, Caracas, 1980.
- [12] Talukdar S., Gallango O. and Chin-A-Lien M.: Generation and migration of hydrocarbon in the Maracaibo Basin, Venezuela: An integrated basin study. *Organic Geochemistry*, Vol. 10 (1986) 261-279.
- [13] Parnaud F, Gou Y, Pascual J.C., Capello M.A., Truskowski I., and Passalacqua H.: Stratigraphic synthesis of western Venezuela. In: A.J. Tankard, R. Suárez and H.J. Welsink (eds.), *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoir 62, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa (1995) 667-679.
- [14] Díaz J.: *Modelado de Cuenca 1D y 2D de Generación, Expulsión y Migración de Petróleo en el Campo Urdaneta Oeste. Cuenca del Lago de Maracaibo*. Trabajo Especial de Grado de Maestría, La Universidad del Zulia, Postgrado en Geología

- Petrolera, 2018.
- [15] Gil Lugo A.: Interpretación Sísmica Estructural 3D del Bloque Urdaneta Oeste. Informe de Pasantía para INTEVEP, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Coordinación de Ingeniería Geofísica, 2011.
- [16] Helwig J., Márquez S. and Carlos G.: 3D Seismic Interpretation of the Geometry and Sequences of Structures, Urdaneta Oeste Block, Maracaibo Basin, Venezuela. INTEVEP, Los Teques, Informe INT-5946,1999, 1999.
- [17] Lugo J. and Mann P.: Jurassic-Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin, Venezuela. In. A.J. Tankard, R.S. Suárez and H.J. Welsink, Petroleum Basins of South America: AAPG Memoir 62, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa (1995) 699-726.
- [18] Mann P., Escalona A. and Castillo M.: Regional geological and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin western Venezuela. AAPG Bull., Vol. 90, No. 4 (2006) 445-477.
- [19] Pöppelreiter M., Balzarini M., De Sousa P, Engel S., Galarraga M., Hansen B., Márquez X., Morell J., Nelson R. and Rodríguez F.: Structural control on sweet-spot distribution in a carbonate reservoir: Concepts and 3-D models (Cogollo Group, Lower Cretaceous, Venezuela). AAPG Bull., Vol. 89, No. 12 (2005) 1651-1676.
- [20] Léxico Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela.: <https://lev.desarrollominero.gob.ve/>, 2010 (Consulta realizada: Mayo, 2018).
- [21] Makeen Y., Abdullah W.H., Pearson M., Hakimi M., Elhassan O. and Hadad Y.: Thermal maturity history and petroleum generation modelling for the Lower Cretaceous Abu Gabra Formation in the Fula Sub- basin, Muglad Basin, Sudan. Marine and Petroleum Geology, Vol. 75 (2016) 310-324.
- [22] Escobar M.: "Geoquímica Orgánica del Petróleo en la Región Nor-Central de la Costa Occidental del Lago de Maracaibo, Venezuela". Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Doctorado en Geoquímica, 1977.
- [23] Escalona A. and Mann P.: An overview of the petroleum system of Maracaibo basin. AAPG Bull., Vol. 90, No. 4 (2006) 657-678.
- [24] Espitalié J., Laporte J.L., Madec M., Marquis F., Leplat P., Paulet J. and Boutefeu A.: Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potential pétrolier et de leur degré d'évolution: Rev. Inst. Fr. Pét., Vol. 32 (1977) 23-42.
- [25] ASTM.: Annual Book of ASTM Standards, Vol. 05.06. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2004.
- [26] Sweeney J.J., Braun R.L., Burnham A.K., Talukdar S. and Vallejos C.: Chemical kinetic model of hydrocarbon generation, expulsion, and destruction applied to the Maracaibo Basin, Venezuela. AAPG Bull., Vol. 79, No. 10 (1995) 1515-1532.
- [27] Allen P. and Allen J.: Basin Analysis. Principles and Applications, 2nd. Ed. Blackwell Publishing, Sydney, 2005.
- [28] Waples D.W., Kamata H. and Suizu M.: The art of maturity modeling, part 1, finding a satisfactory geologic model. AAPG Bull., Vol. 76, No. 1 (1992) 31-46.
- [29] Waples D.H.: Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration. AAPG Bull., vol. 64 (1980) 916-926.
- [30] Tissot B.P. and Welte D.H.: Petroleum Formation and Occurrence, 2nd ed. Springer-Verlag, New York, 1984.
- [31] Angarita M.J, Díaz J., Luzardo F., Montilla O., Vargas C. y Valbuena E.: Proyecto Generador de Prospectos Urdaneta Oeste 2019. PDVSA, Maracaibo, Gerencia de Proyectos Exploratorios Occidente.
- [32] Klemme H.D.: Geothermal gradients, heat flow and hydrocarbon recovery, in Fischer A.G. and Judson S., eds., Petroleum and Global Tectonics. Princeton University Press, New Jersey (1975) 251-304.
- [33] Talukdar, S. and Marcano, F.: Petroleum system of the Maracaibo basin, Venezuela. In Magoon L.B. and Dow W.G., The Petroleum System - from Source to Trap. AAPG Memoir 60, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa (1994) 463 - 481.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Vol. 43. N°2, Mayo - Agosto 2020, pp. 58 - 110 _____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Abril de 2020, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve

www.serbi.luz.edu.ve

www.produccioncientifica.luz.edu.ve