

Modelado Cinemático-Geoquímico 2D Como Herramienta Para Investigar La Evolución De Sistemas Plegados. Un Caso De Estudio De La Cuenca Oriental De Venezuela.

A. E. VARGAS & A. BERNAL

PDVDA-INTEVEP, Urb Santa Rosa, El Tambor, Los Teques, Venezuela.

RESUMEN

La Cuenca Oriental de Venezuela cuenta con unas reservas probadas de 54 MMBbls de petróleo y 107 BPC de gas. Aunque ha sido ampliamente estudiada en los últimos 20 años, aún pueden identificarse áreas exploratorias dentro de esta prolifera cuenca. Diferentes modelos tectónicos que explican su origen y evolución han sido propuestos, basados principalmente en datos geológicos y geofísicos. Sin embargo, muy pocos estudios han considerado información geoquímica. En esta contribución, un estudio a escala regional ha sido desarrollado para validar varios modelos tectónicos y cinemáticas de deformación, integrando datos geológicos, geofísicos y geoquímicos.

El modelado gravimétrico y magnético permitió evaluar y seleccionar aquellos modelos tectónicos cuya configuración estructural responde satisfactoriamente a los datos potenciales. Posteriormente, empleando un modelado cinemático-geoquímico 2D acoplado, la cinemática de deformación para cada modelo fue validada con datos de madurez de roca madre, ubicados en superficie y pozos. El modelado tectónico-geoquímico suministró además, información respecto al tiempo de formación de estructuras, evolución de la madurez de la roca madre, generación y expulsión de hidrocarburos.

El análisis de los modelos evaluados en este trabajo llevó a proponer una cinemática que contempla una deformación fuera de secuencia, activando primero estructuras en la zona frontal del *hinterland*, seguida de una deformación en la zona posterior y por último la activación de la zona media y delantera del mismo, para así alcanzar los niveles de madurez encontrados en el sistema plegado. Es recomendable incluir simulación de migración de fluidos con el objeto de reducir la incertidumbre del presente estudio.

INTRODUCCION

La Cuenca Oriental de Venezuela (COV) es uno de los resultados de la colisión oblicua entre las placas Caribe y América del Sur, que se generaron de manera diacrónica desde el oeste hacia el este, configurando así una cuenca sedimentaria tipo antepaís, que cuenta con unas reservas probadas de 54 MMBbls de petróleo y 107 BPC de gas.

Diversos autores han propuesto diferentes modelos estructurales y cinemáticos que explican el origen y evolución de la Cuenca Oriental de Venezuela, integrando datos geológicos y geofísicos (ej. *Roure, F. et al., 1994, Passalacqua, H. et al., 1995, Chevalier, Y. et al., 1994, Hung, E., 1997*). Además, se han realizado estudios geoquímicos que establecen la generación y migración de hidrocarburos en determinadas áreas de la cuenca (ej. *Gallango, O. y Parnaud, F., 1995, Summa, L. et al., 2003*).

La integración de información geológica, geofísica y geoquímica ha demostrado ser una metodología poderosa para la calibración de modelos tectónicos y el análisis del sistema petrolífero en dos dimensiones en áreas estructuralmente complejas, como las encontradas en la COV (ej. *Fintina, C., 2003, reportes internos en PDVSA-Intevep*). No obstante, estos trabajos se enfocan en geometrías y cinemáticas particulares y no exploran las implicaciones de diferentes modelos tectónicos en el sistema petrolífero del área.

Cabe destacar que la mayoría de los trabajos de modelado geoquímico de generación, expulsión y migración de hidrocarburos desarrollados en la Cuenca Oriental de Venezuela, se han enfocado desde una visión 1D (ej. *Vivas, 2000; Rodríguez, 2000; Hernández, 2001; informes técnicos de PDVSA-Intevep*), lo cual deja fuera de contexto el componente lateral de flujo de calor y de fluidos, considerados de gran importancia en áreas tectónicamente complejas (ej. *Gallango, O. y Parnaud, F., 1995*).

Con el fin de establecer las implicaciones de diferentes modelos estructurales y cinemáticos en los procesos de generación y expulsión de hidrocarburos en la zona occidental de la Cuenca Oriental de Venezuela (figura 1), se desarrolla un modelado cinemático-geoquímico 2D usando la aplicación INGECEC desarrollada por PDVSA-Intevep. Para validar los modelos cinemáticos y estructurales propuestos, los resultados 2D del modelado geoquímico son comparados con datos de madurez de roca madre disponibles en el área.

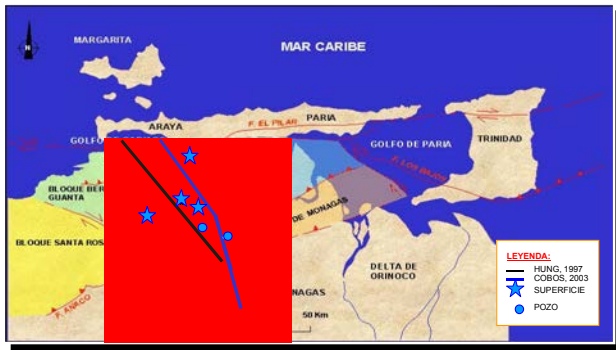


Figure 1. Localización del área de estudio.

BASE DE DATOS Y METODOLOGIA

La metodología empleada comprende: (1) la búsqueda exhaustiva y recopilación de trabajos desarrollados en la Cuenca Oriental de Venezuela, relacionados con el aspecto geológico-estructural a escala regional e información geológica, geofísica (datos potenciales) y geoquímica detallada del área de estudio requerida para la etapa de simulación, (2) la evaluación de la configuración geométrica-estructural de modelos propuestos, empleando principalmente datos gravimétricos y (3) la validación de la cinemática de deformación propuesta para cada uno de los modelos tectónicos, integrando datos de madurez de roca madre (Ro).

Para el procesamiento gravimétrico, se trabajó con el banco de datos potenciales de PDVSA-Intevep (Passalacqua, et al, 1985, Informe Técnico PDVSA Intevep), se elaboraron los mapas de Anomalía de Bouguer, Residual de Anomalía de Bouguer, Intensidad Magnética Total y Reducción al Polo para el área en cuestión,

El mapa de Anomalía de Bouguer se construyó empleando un grid de 2 Km (2000 x 2000 m²) y una densidad promedio para los sedimentos de 2,30 gr/cc, siendo éste el valor más adecuado para los sedimentos del oriente del país, según perfiles de Nettleton (Fernández y col, 1997). La Anomalía Residual se obtuvo de una simple resta de la Anomalía de Bouguer y el Regional, obtenido por la técnica de continuación de campo hacia arriba, la cual arrojó un regional muy simple.

Los mapas de Intensidad Magnética Total y Reducción al Polo, se elaboraron utilizando un grid de 500 m (500 x 500 m²), una intensidad de campo magnético de 35000 gammas, una

inclinación magnética de 35° y una declinación magnética de -10°.

El modelaje bidimensional gravimétrico y magnético se llevó a cabo bajo la aplicación del software GM-SYS de la plataforma GEOSOFT, se generaron los perfiles gravimétricos y magnéticos (en miligals y gammas respectivamente) en función de la distancia y dirección de los transectos regionales disponibles.

Se consideraron como parámetros variables la densidad, susceptibilidad y magnetización (gauss) y se conservó la geometría de las unidades involucradas en los diferentes modelos, ya que el objetivo consiste precisamente en evaluar el arreglo estructural y geométrico propuesto en cada uno de estos modelos.

La validación cinemática de los modelos seleccionados, se realizó bajo INGECEC 6.9, considerando la cinemática de deformación propuesta para cada sección, los cambios laterales de facies sedimentarias y facies orgánicas dentro del intervalo roca madre, para el modelado termal se empleó un flujo de calor basal de 41 mW/m² y una temperatura de superficie de 24°C (*reportes internos en PDVSA-Intevep*). Los resultados obtenidos se comparan con datos de madurez de roca madre ubicados en superficie y pozo.

MODELADO GRAVIMETRICO

En la figura 2 se contempla la evaluación gravimétrica de ocho (8) modelos tectónicos, que difieren en cuanto su arreglo geométrico y configuración estructural, propuestos por diversos autores empleando principalmente datos geológicos y geofísicos, en el sector occidental de la Cuenca Oriental de Venezuela,

En el perfil gravimétrico, la línea delgada (roja) representa la curva gravimétrica calculada a partir del modelo y la gruesa (naranja) obedece a la observada, en la parte inferior derecha se reporta el error asociado a la diferencia entre ellas.

Passalacqua, H. et al., 1995, proponen un modelo cuya característica principal es una subducción hacia el Norte de al menos 70 km de litósfera continental de la Placa Suramericana, principalmente manto intracontinental y partes de la corteza inferior (figura 2.a).

Hung, E., en 1997, sugiere seis propuestas estructurales diferentes:

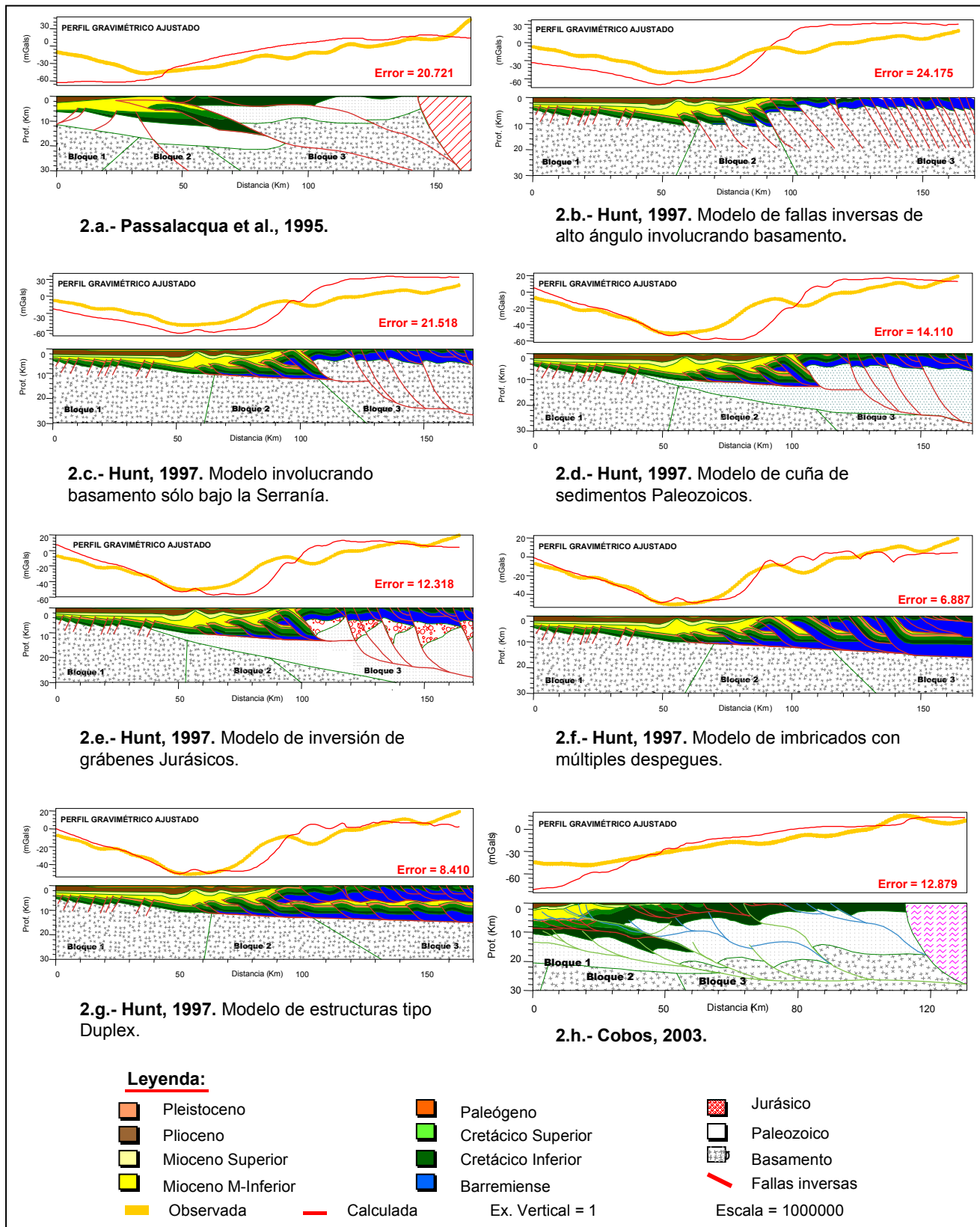


Figura 2. Modelado gravimétrico de modelos estructurales propuestos para el occidente de la Cuenca Oriental de Venezuela.

1- Modelo con estructuras involucrando basamento: asume fallas inversas de alto ángulo a lo largo del cinturón, el extremo sur está caracterizado por fallas normales, propone basamento somero entre 4-6 Km de profundidad y despegues intra-basamento (figura 2.b).

2- Modelo con estructuras involucrando basamento solamente bajo la Serranía: propone una espesa cuña de rocas Precámbricas yuxtapuesta por estructuras de despegue en el Piedemonte. Sugiere despegues regionales intra-basamento y despegues adicionales en la base de la sección Pre-Barranquin y Mioceno (figura 2.c).

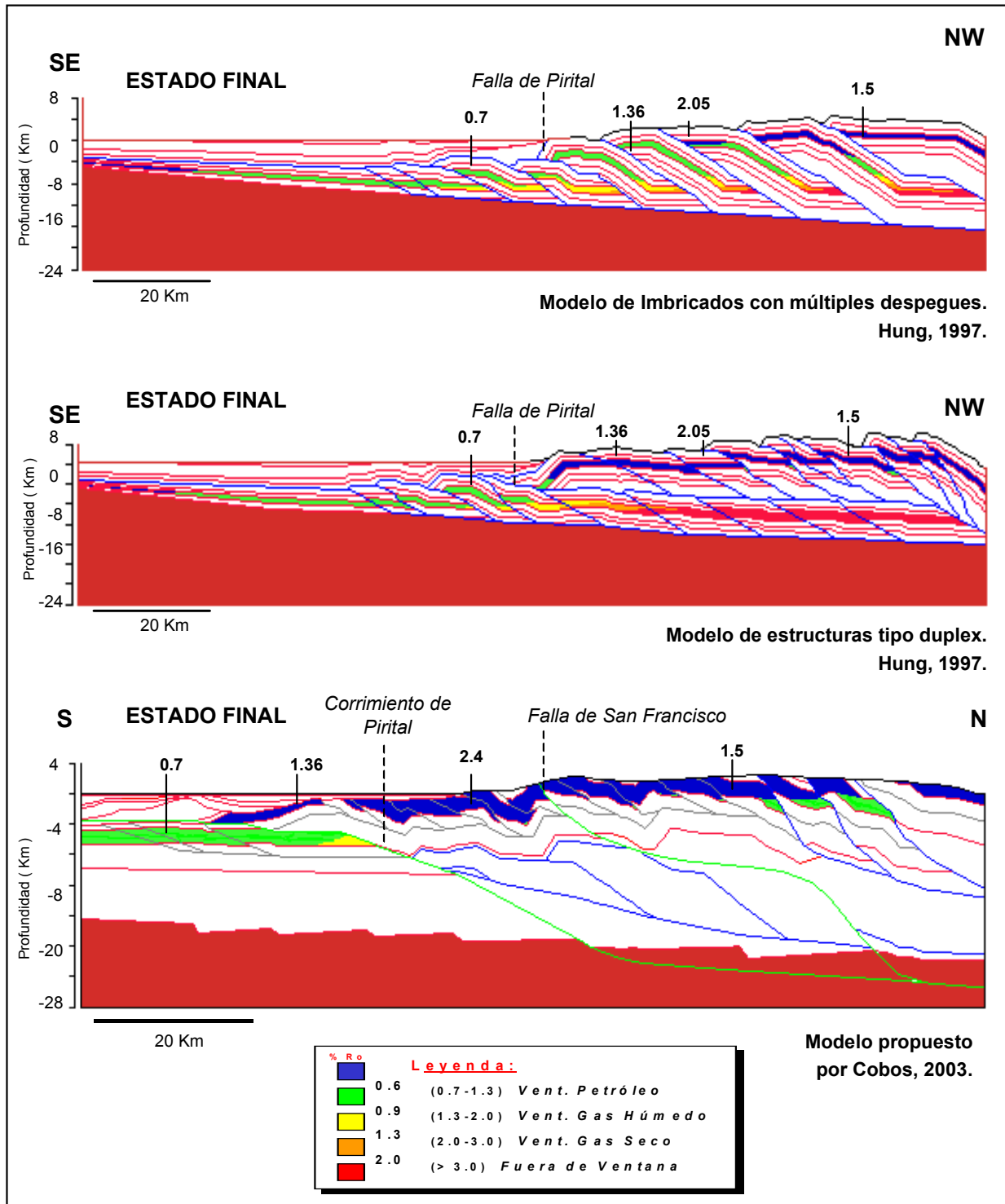


Figura 3. Validación de cinemáticas de deformación propuestas para el occidente de la Cuenca de Venezuela.

3- Modelo de cuña de sedimentos Paleozoicos: sugiere una cuña de sedimentos Paleozoicos deformados sólo por debajo de la Serranía y una rampa regional de bajo ángulo que separa a los sedimentos Paleozoicos del Basamento. Involucra despegues intra-Paleozoico, base Pre-Barranquín y Mioceno Inferior. (figura 2.d).

4- Modelo de inversión de grábenes Jurásicos bajo la Serranía: involucra basamento, asume inversión de grábenes Jurásicos y menciona que las evaporitas del Jurásico Tardío – Cretácico Temprano pueden coincidir con despegues locales (figura 2.e).

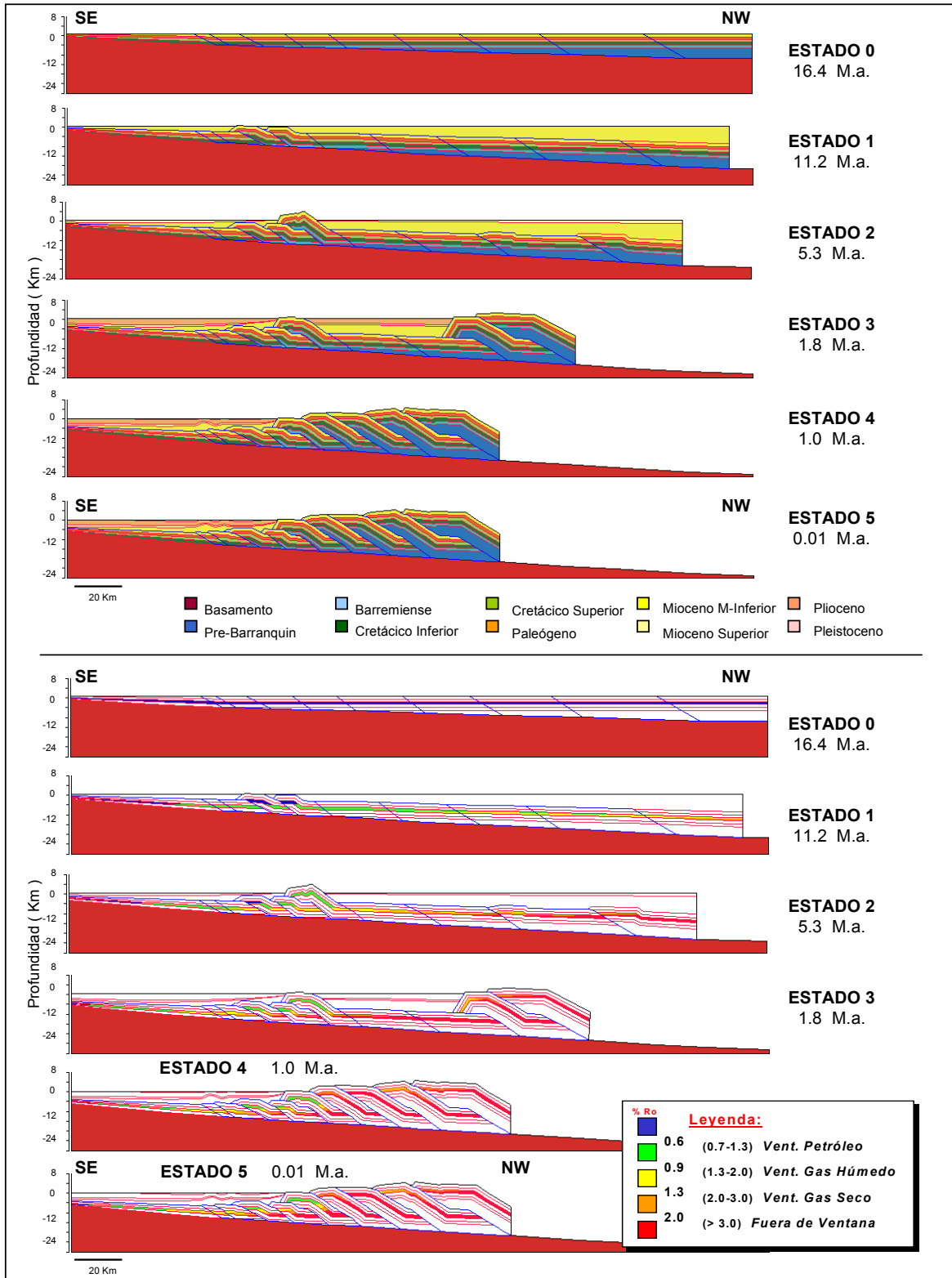


Figura 4. Nueva propuesta cinemática de deformación. Modelo de Imbricaciones con múltiples despegues, Hung, 1997.

5- Modelo de imbricados con múltiples despegues: muestra imbricaciones asociadas con corrimientos de alto ángulo y grandes espesores de los sedimentos Pre-Barranquin correspondiéndose con el incremento de espesor hacia el norte del margen pasivo. Involucra despegues en la Base Pre-Barranquin, Mioceno Inferior y tope del Barremiense en la Serranía (figura 2.f).

6- Modelo de estructuras duplex bajo la Serranía: sugiere una repetición de secuencia Cretácica-

Oligocena de margen pasivo por debajo de la Serranía y parte del Piedemonte y asume múltiples estructuras anticlinales bajo la Serranía (figura 2.g).

Cobos, S. 2003, propone un modelo caracterizado por una tectónica superficial de piel delgada y una tectónica de mayor amplitud, la cual, involucra a las unidades pre-paleozoicas en la deformación y, a su vez, afecta a las estructuras superficiales, reactivándolas y deformándolas (figura 2.h).

De los resultados obtenidos de la validación gravimétrica, se seleccionaron dos de los modelos propuestos por Hung (modelo de imbricados y duplex) y el de Cobos, ya que, se ajustan mejor a los datos disponibles en el área.

MODELADO CINEMATICO-GEOQUIMICO 2D

El modelado cinemático-geoquímico 2D de los modelos seleccionados, contempla la validación de las secuencias de deformación propuestos para cada uno, integrando datos de madurez (%Ro) de roca madre (cretácica).

Hung 1997, propone un desarrollo de la deformación en secuencia a partir del Mioceno Medio hasta el presente. Por otra parte, Cobos 2003, establece un primer sistema de corrimientos durante el Mioceno Inferior, con un despegue basal en el tope del Cretácico Inferior, el segundo durante el Mioceno Medio, deformando al sistema de corrimientos previo, y dando lugar a la formación de la primera estructura de Pirital y el tercero se emplazó durante el Mioceno Superior-Plioceno, reactivando a las estructuras previas.

En la figura 3, se observan los resultados para el estado final de la madurez de roca madre en cada uno de los modelos. Claramente se observa que no se alcanzaron los valores medidos en superficie y pozo.

Una nueva propuesta de deformación es presentada en las figuras 4 y 5, calibrada con datos de madurez (%Ro). Esta contempla una deformación fuera de secuencia, activando primero estructuras en la zona frontal del *hinterland*, lo que permite una gran depositación del Mioceno Medio hacia el norte del área de estudio. Esto implicó un gran soterramiento e incremento de la madurez de la roca madre, por lo cual hay generación y expulsión de hidrocarburos en la zona norte a finales del Mioceno Medio (11.2 M.a.) (figura 6 y 7).

Una posterior deformación en la zona posterior (norte del *hinterland*), levantamiento y erosión al norte provoca en la zona media del sistema plegado un nuevo episodio de generación y expulsión de hidrocarburos pero en menor cantidad de mediados a finales del Mioceno Superior y Plioceno (figuras 6 y 7). Por último, durante el comienzo del Pleistoceno, activación de la zona media y delantera del cinturón plegado, activa la generación y expulsión en la zona del frente de deformación, (figuras 6 y 7).

CONCLUSIONES

El modelado gravimétrico permitió evaluar la configuración geométrica y estructural de los modelos propuestos para el occidente de la COV, además, estableció un criterio de selección para secciones estructurales a ser validadas cinemáticamente.

Los modelos geológicos que mejor se ajustan a los datos potenciales del área son: El modelo de imbricados con múltiples despegues y el modelo de estructuras tipo duplex, los cuales no involucran basamento, propuestos por Hung, 1997 y el modelo que combina una tectónica superficial de piel delgada y una tectónica de mayor amplitud, involucrando unidades pre-paleozoicas, planteado por Cobos, 2003.

El modelado cinemático-geoquímico 2D acoplado, demostró ser una herramienta poderosa en la evaluación y validación de secuencias de deformación en sistemas complejos.

El análisis de los modelos evaluados en este trabajo llevó a proponer una cinemática que contempla una deformación fuera de secuencia, activando primero estructuras en la zona frontal del *hinterland*, seguida de una deformación en la

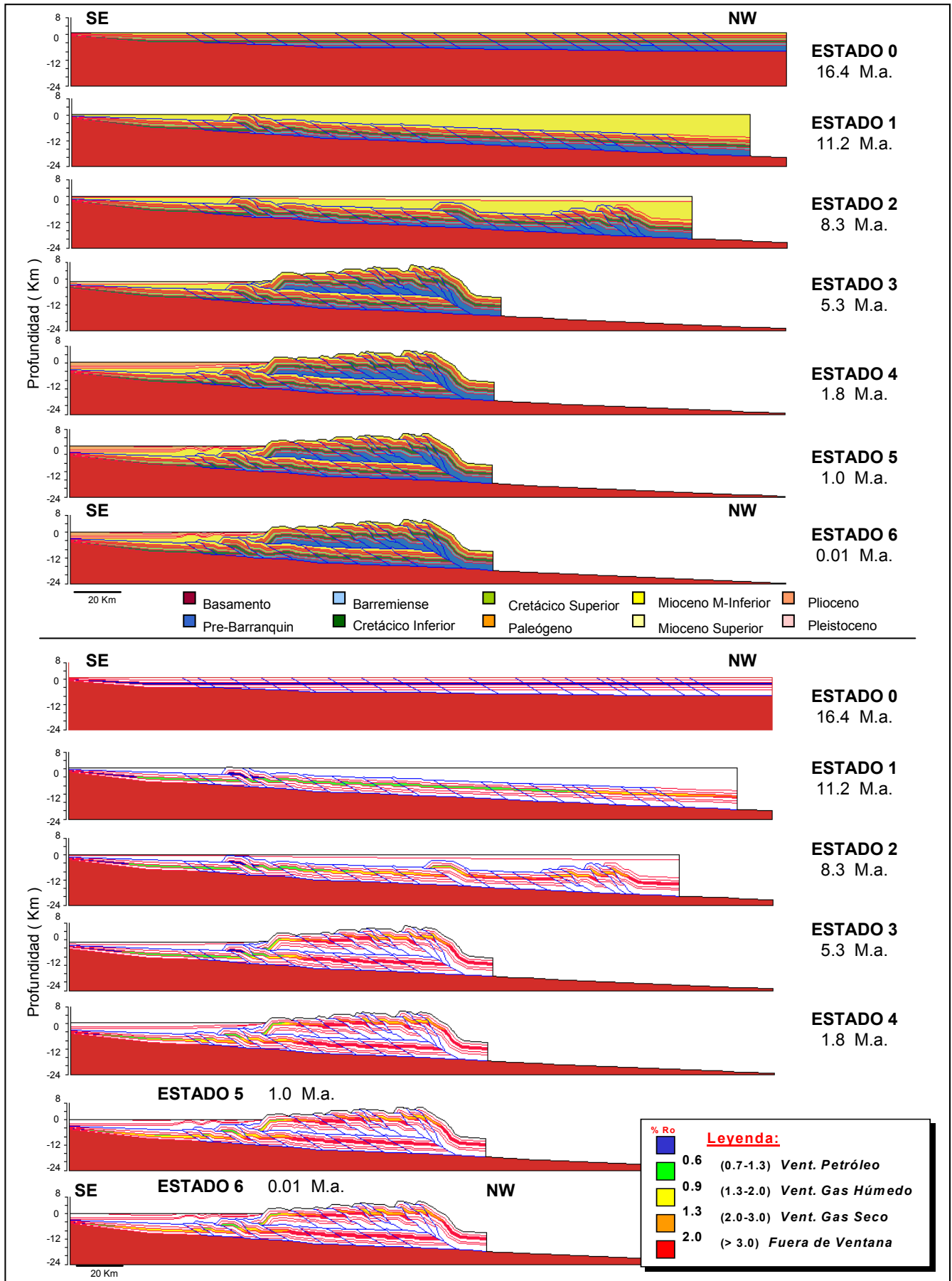


Figura 5. Nueva propuesta cinemática de deformación. Modelo de estructuras tipo Duplex, Hung, 1997.

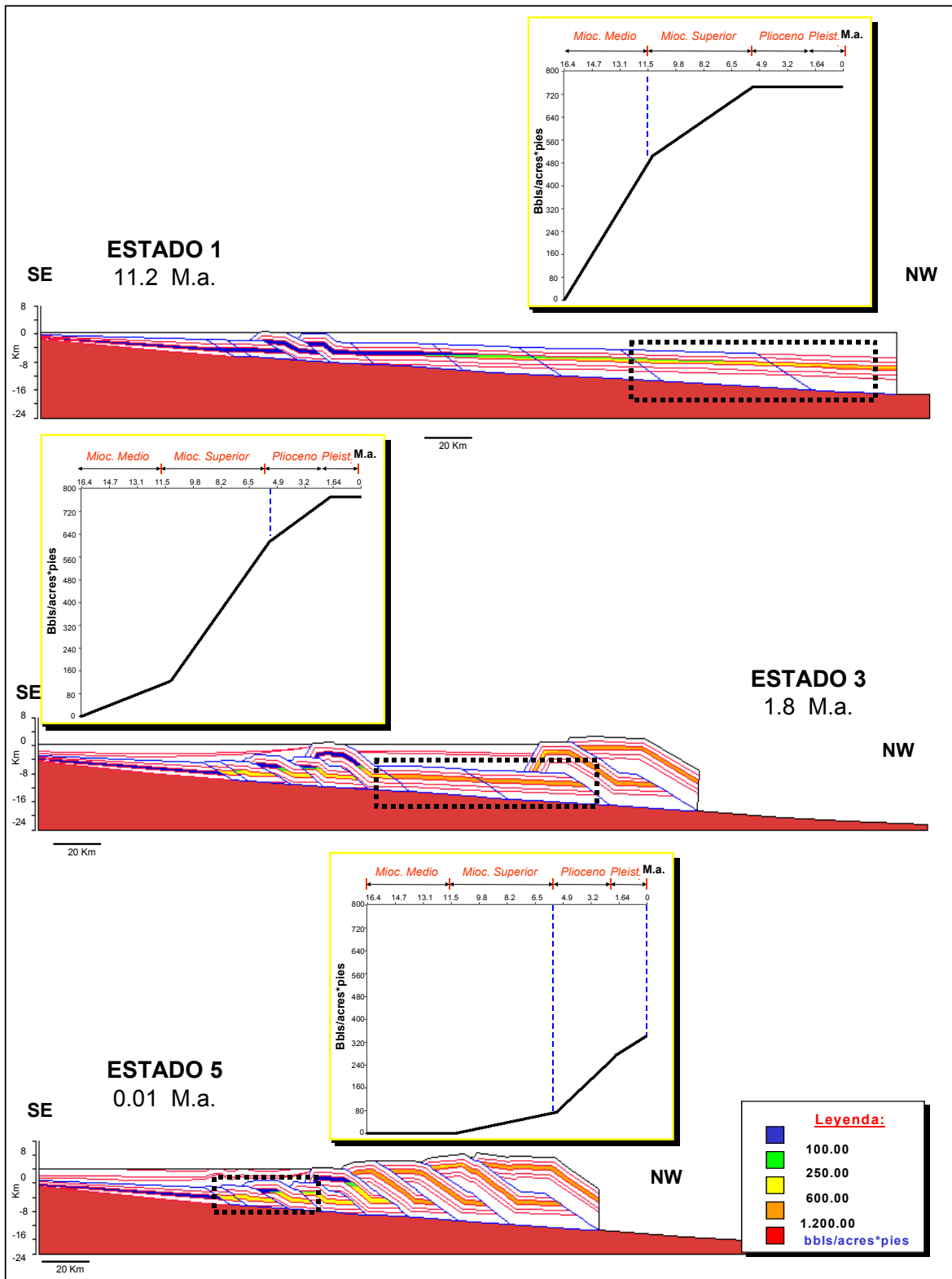


Figura 6. Implicaciones en la generación y expulsión de hidrocarburos. Modelo de Imbricaciones con múltiples despegues, Hung, 1997.

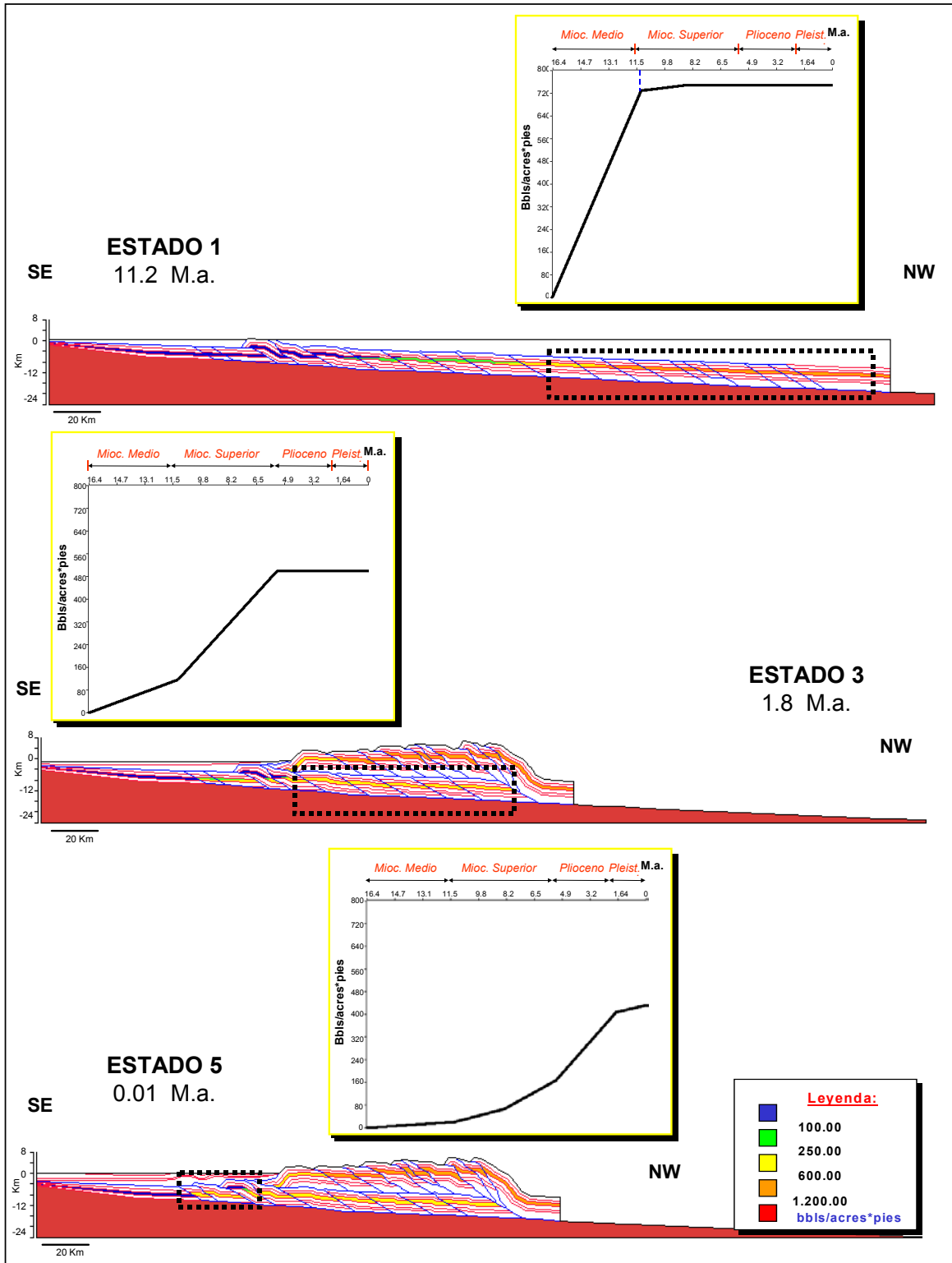


Figura 7. Implicaciones en la generación y expulsión de hidrocarburos. Modelo de estructuras tipo Duplex, Hung, 1997.

zona posterior y por último la activación de la zona media y delantera del mismo, para así alcanzar los niveles de madurez encontrados en el sistema plegado.

Las configuraciones estructurales de los modelos contemplados bajo una cinemática de deformación fuera de secuencia, implican una generación y expulsión de hidrocarburos por parte de la roca madre cretácica (Querecual) en la zona norte del área, al comienzo de la deformación (Mioceno Medio), se infiere que estos han podido rebosar las estructuras formadas en la zona frontal, y migrar hacia el sur de la cuenca.

Ambos modelos tectónicos bajo la nueva secuencia de deformación propuesta (fuera de secuencia), implican más de un evento de generación y expulsión a lo largo de la cuenca, provocando varios eventos de carga. Esto se espera debe verse reflejado en la data geoquímica de los hidrocarburos encontrados en el área. Es recomendable incluir simulación de migración de fluidos con el objeto de reducir la incertidumbre del presente estudio.

REFERENCIAS

- Chevalier, Y., 1994**, A transverse section from the Orinoco Oil Belt to the El Pliar Fault System, Tectonic and Stratigraphy. Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos, Field Trip, V Simposio Bolivariano, Puerto La Cruz, Venezuela.
- Cobos G. Luz S., 2002**, Interpretación estructural en el cinturón plegado de Monagas, por medio de la integración de datos sísmicos, datos de pozo y geología de superficie. Tesis de Grado. Universidad Simón Bolívar.
- Dietrich, R., 2000**, Canadian Rocky Mountains: Cross Sections and Flyby Scketches. Albert W. Bally Symposium & Bert Fest, Rice University Houston, Texas, USA, April 2000.
- Fernández, F., Passalacqua, H., Pérez, G., Flores, J., Pulido, C., 1997**. Procesamiento e Interpretación de Datos Potenciales en el área de Dragal-Cajigal. Informe Técnico de PDVSA Intevep, 28 p.
- Hernández, P., 2001**, Modelaje Geoquímico de Generación de Hidrocarburos en el área de Urica-Mundo Nuevo. Estado Anzoátegui, Venezuela. Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela.
- Hung, E., 1997**, Foredeep and thrust belt interpretation of the Maturin Subbasin, Eastern Venezuela Basin. Msc Thesis, Rice University, Houston, Texas, USA. 185p.
- Jácome, M.I., 2001**, The Formation of the Monagas Foreland Basin: Eastern Venezuela. Ph.D. Thesis, University of Liverpool, Liverpool, England, U.K. 204p.
- Martinez, J.A. (1995)**. A geological and geophysical study of structural style along a transect of the Maturin subbasin, Eastern Venezuela Basin. University of South Carolina. Tesis de Maestría.
- Passalacqua, H., Fernandez, F., Gou, Y. and Roure, F., 1995**, Crustal architecture and strain partitioning in the Eastern Venezuelan Ranges *in* Tankard, A.J., Suarez, R., and Welsink, H.J. (eds.): Petroleum basins of South America. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, M. 62, p.667-679.
- Passalacqua, H., Randazzo, S., Gutiérrez, M., Sena, A., Palacios, C., 1985**. Sistema de Procesamiento y Banco de Datos Potenciales de Venezuela. Informe Técnico de PDVSA Intevep, 580 p.
- PGO Urica-Mundo Nuevo (2002)**. Informe en Progreso. PDVSA-Exploración. pp 85-90.
- PGP Cotoperí. (2002)** Informe final. PDVSA Exploración. pp 7, 180.
- Rossi, T., 1985**, Contribution a l'étude geologique de la frontiere Sud-Est de la plaque Caraibes Etude geologique de la Serranía, La Serranía del Interior Oriental (Venezuela) sur le transect Cariaco-Maturin, Syntheses Paleogeographique et Geodynamique. Ph.D. Thesis, Universitede Bretagne Occidentale, France. 340p.
- Roure, F., Carnevali, J.O., Gou, Y. and Subieta, T., 1994**, Geometry and kinematics of the North Monagas Thrust Belt (Venezuela). Marine and Petroleum Geology, v.11, n. 3, p. 347-362.
- Ysaccis, R. and Audemard, F.E., 2000**, A Neogene Orogenic Float in Northern South America: Eastern Venezuela Basin vs. Caribbean Plate. American Association of Petroleum Geologists, Annual Meeting, New Orleans, USA.
- Gallango, O. and Parnaud, F., 1995**, Two-dimensional computer modeling of oil generation and migration in a transect of the Eastern Venezuelan basin, *in* A. J. Tankard, R. Suárez S., and H. J. Welsink, Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62, p. 727-740.
- Summa, L. L., Goodman, E. D., Richardson, M., Norton, I. O. and Green, A. R., 2003**, Hydrocarbon systems of Northeastern Venezuela: plate trough molecular scale-analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela Basin. Marine and Petroleum Geology, 20, p.323-249.