

# Nuevo Modelo Estructural generado a partir de datos de superficie, sísmicos y de pozos para la parte Central del Flanco Surandino, Subcuenca Barinas – Venezuela

Ana Goncalves<sup>1\*</sup>, Angel Sánchez<sup>1</sup>, Erick Moreno<sup>1</sup>, Henry Rojas<sup>1</sup>, Emilys Patiño<sup>1</sup>, Josaine Mendoza<sup>1</sup>, Lucila Hernández<sup>1</sup>, Gilberto Sánchez<sup>1</sup>, Jesús Fuentes<sup>2</sup>. 1. PDVSA Exploración, Puerto La Cruz, Venezuela. \*goncalvesam@pdvsa.com  
2. EXGEO, Puerto LaCruz, Venezuela.

## Resumen

El objetivo de este trabajo fue reevaluar los elementos tectónicos asociados a los prospectos exploratorios ubicados en la parte Central del Flanco Surandino, perteneciente a la Subcuenca de Barinas, mediante el análisis de mapas geológicos de superficie, información sísmica 2D y datos de pozos. Para el estudio, se balancearon 26 secciones estructurales y se generó el modelo geológico tridimensional de la región. Además, se realizó la restauración de la línea sísmica “D” al Tope del Eoceno, permitiendo definir la evolución estructural regional, desde el Eoceno hasta la actualidad.

Durante el Eoceno Temprano, se comienza a depositar la Formación Gobernador y se reactivan las fallas normales Precretácicas. Para el Eoceno Tardío-Oligoceno, se deposita la Formación Pagüey y comienza el emplazamiento de las Napas de Lara desde el Noroeste, continuando con el proceso de reactivación de fallas preexistentes. Durante la depositación de las formaciones Parángula y Río Yuca, en el Mioceno, se inicia el levantamiento andino, el cual se superpone al estructuramiento Paleógeno y comienza el proceso de inversión de las fallas normales antiguas, originando estructuras de gran tamaño.

## Introducción

El área de estudio corresponde a la parte central del Flanco Surandino, ubicado en la Subcuenca de Barinas, en la región Centro-Occidental de Venezuela. Está limitada al Norte por la presencia del sistema Fallas Dextral de Boconó y al Sur, por el área correspondiente al dominio poco deformado, de la Subcuenca de Barinas.

La primera perforación exploratoria realizada en la Cuenca Barinas-Apure se realizó en el Flanco Surandino en Junio de 1930, la cual no alcanzó los objetivos programados por problemas mecánicos. Posteriormente, la actividad exploratoria se reinicia en el área en el año 1961, con la perforación de otro pozo dando como resultado yacimientos con bajas porosidades. A raíz de estos resultados la actividad exploratoria se detiene en dicha área, hasta reiniciarse a principio de los 90, con la perforación de los pozos P-1 y P-5 (Figura 1 y 2), los cuales descubrieron gas seco a nivel de las formaciones Gobernador y Escandalosa. A partir de estos

resultados, y los que arrojaron los pozos perforados posteriormente, se ha incrementado el interés por ubicar nuevas trampas asociadas a gas en el área.

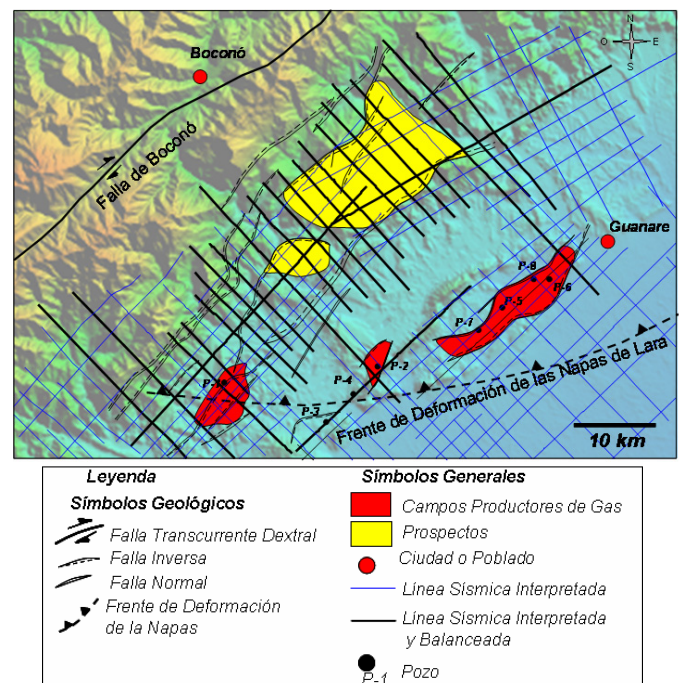


Figura 1. Ubicación del área de estudio

## Datos e Información utilizados para el Modelo Estructural

Para el análisis del modelo estructural del área, se utilizaron los siguientes datos:

**Información Sísmica:** En el proceso de interpretación sísmica estructural, se utilizaron aproximadamente, los datos de 2840 km. de líneas sísmicas 2D de diversos levantamientos sísmicos (figura 1).

La calidad de la resolución sísmica es de buena a pobre (en el caso de los levantamientos ubicados al norte del área de estudio). Las principales limitaciones son: bajo contenido de

frecuencia, baja relación señal-ruido y poca continuidad de los reflectores sísmicos. Estos efectos se atribuyen a factores variados, principalmente a la compleja geología presente en el área de estudio (fallamiento intenso y estratigrafía variable) la cual se evidencia, mayormente, hacia el piedemonte de los Andes de Mérida.

**Información de pozos:** Se utilizaron topes formacionales, registros sísmicos, curvas de los registros sónico-densidad previamente validados y certificados, que permitió la generación de seis (6) sismogramas sintéticos.

**Geología de superficie:** Mapa geológico generado por las compañías Creole en 1951, Aguasuelos en 1990, ELF en 1997 (Figura 2), y Repsol en 2002. Además, esta información se complementó con los mapas topográficos del área.

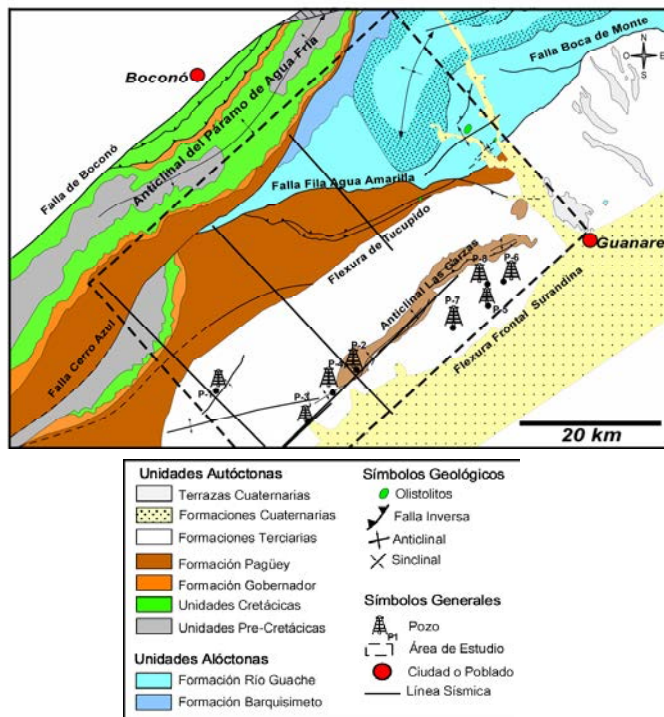


Figura 2. Mapa de geología de superficie. Modificado d ELF, 1997

**Interpretación Sísmica y Modelo Estructural**

La interpretación sísmica estructural se realizó empleando información de los levantamientos sísmicos de Barinas, Este-Sureste Caipe, Río-Socopó-Boconó y Río-Boconó-Acarigua.

Esta información fue calibrada con la correlación de los pozos, P-1, P-2, P-3 y P-5. La calibración permitió identificar los eventos sísmicos asociados al Tope del Basamento Pre-Cretácico, Tope de la Formación Escandalosa, Tope de la Formación Gobernador y Discordancia regional, asociada a la base molásica o tope de la Formación Pagüey.

El área presenta una cubierta sedimentaria conocida a través de la perforación de pozos e información del mapa geológico de superficie, comprendida entre el Pre-Cretácico y Cuaternario (Figura 3). Esta cubierta corresponde a dos dominios fácilmente diferenciados por geología de superficie.

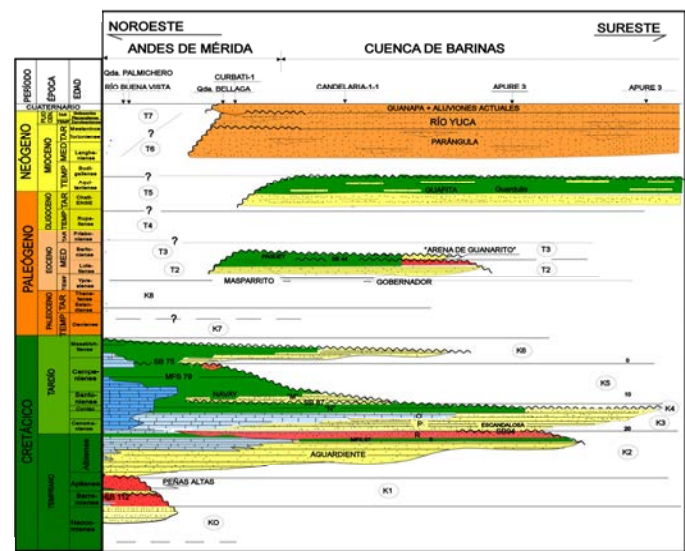


Figura 3. Cuadro Cronoestratigráfico de los Andes de Mérida y la Cuenca de Barinas (Modificado de Parnaud, 1995)

El dominio autóctono, caracterizado por presentar una columna estratigráfica que va desde el Pre-Cretácico hasta el Cuaternario. El basamento Pre-Cretácico está comprendido por un complejo Metamórfico y Metaígneo Precámbrico correspondiente a la Asociación Bella Vista, con una cobertura Paleozoica, con metamorfismo de bajo grado correspondiente a la Asociación Cerro Azul. A estas rocas suprayacen los sedimentos correspondientes a la Formación La Quinta, de edad Jurásico. La cobertura Mezozoica está caracterizada por sedimentos de las Formaciones Aguardiente, Escandalosa (cuyo miembro “O” representa un intervalo con excelentes características de roca reservorio), Navay (conocido como la roca madre del área de estudio) y Burgüita. El intervalo Paleógeno está constituido por los sedimentos de las Formaciones Gobernador (con intervalos arenosos y calcáreos con buenas características de roca reservorio) y Pagüey (que representa la roca sello a nivel regional en el área). El

intervalo Terciario está caracterizado por rocas de las Formaciones Parángula y Río Yuca, también conocidas como Molasa Andina y por último, la Formación Guanapa, que representa el Cuaternario de la zona de estudio (Figura 4).

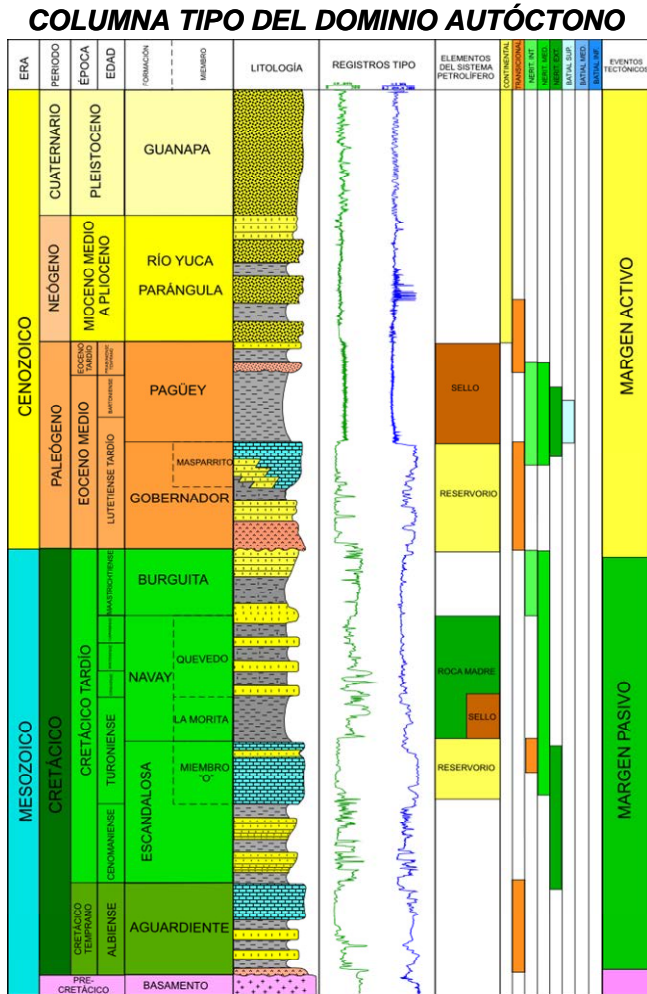


Figura 4. Columna Estratigráfica correspondiente al dominio autóctono del área de estudio.

El dominio alóctono corresponde a la zona de cabalgamiento de la Napa de Lara. Por encima de este corrimiento superficial, descansan sedimentos alóctonos y paraúctonos que van desde el Cretácico hasta el Cuaternario. La base de la columna generalizada del bloque alóctono está representada por la Formación Barquisimeto de edad Cretácico, seguida de la Formación Río Guache, de edad Maaschtrictiense-Eoceno?. A estos sedimentos suprayace la sección paraúctona de la Formación Pagüey de edad Eoceno, seguida de la sección Terciaria y Cuaternaria, anteriormente descrita (Figura 5).

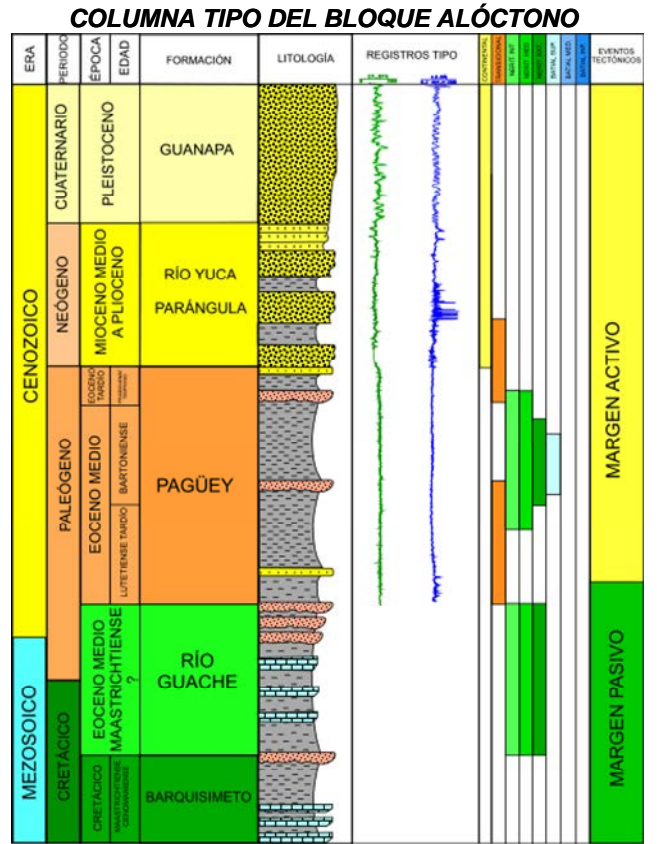


Figura 5. Columna Estratigráfica correspondiente al bloque alóctono.

Desde el punto de vista estructural, el área está organizada en tres (3) sectores bien diferenciados de Noroeste a Sureste: *El Sector 1*, se ubica al noroeste del frente de deformación del cinturón plegado del Alóctono Caribe, el cual presenta el levantamiento o dominio interno de los Andes. *El sector 2*, se encuentra en la zona de transición, donde la deformación compresiva Miocena que genera el levantamiento de los Andes se sobre-impone al estructuramiento Paleógeno que se desarrolló durante la Acreción del Terreno del Caribe, produciendo inversión estructural y corrimientos de ángulo bajo involucrando el basamento. En este sector se ubican las estructuras de los prospectos 1 y 2. Y el *Sector 3* al Sureste (Antepaís poco deformado), presenta en general fallas normales de edad Eocena y Pre-Cretácica. Los efectos del levantamiento andino se atenúan en sentido NW-SE, de manera tal que el Sector 1 presenta la mayor influencia tectónica de este evento y el Sector 3, presenta una influencia casi nula del mismo (Figura 6).



Para la definición del estilo estructural se analizaron los datos geológicos, seleccionando la línea sísmica “A”, que pasa por el pozo 2 (**Figura 7 y 10**), la cual permitió visualizar las configuraciones paleoestructurales que inciden directamente en el entendimiento de la evolución estructural de la cadena andina del Flanco Surandino.

La sección restaurada al Tope del Eoceno, permitió validar el modelo estructural propuesto. En esta se refleja las geometrías de las estructuras distensivas que deforman el Basamento y el Cretácico, los corrimientos del Alóctono Caribe y la inversión y generación de fallas inversas, durante el Mioceno. El acortamiento estimado fue de 5 km.

Una vez definido el modelo estructural a nivel regional, se interpretó el resto de las líneas sísmicas 2D en tiempo y se modelaron en profundidad (**Figuras 8 y 9**), para llegar a los siguientes resultados:

El área de los prospectos 1 y 2 se encuentra en la faja plegada y fallada del Flanco Surandino, la cual ha sido sometida a varios episodios de deformación, donde se interpretan fallas normales del Eoceno, algunas con componente transcurrente y/o reactivadas como inversas, cortadas y desplazadas por retrocorrimientos durante la Compresión Andina (**Figuras 7 y 9**). El rumbo del sistema de fallas es principalmente Noreste-Suroeste.

### **Integración de Información Sísmica con Datos de Geología de Superficie**

Como se mencionó anteriormente, para la integración de información de subsuelo con superficie se utilizaron los mapas realizados por las compañías Creole de 1951 (F-4), Aguasuelos en 1990, ELF en 1997 y Repsol en 2002. Existen algunas diferencias en los contactos litológicos y ocurrencia de cada formación, las que se tomaron en cuenta para hacer la integración, principalmente, en aquellas zonas entre el Dominio Alóctono y el Autóctono.

De acuerdo a la información de superficie, el área se puede dividir en tres sectores alineados en dirección NE-SO:

1. Un sector inferior, que corresponde al área donde aflora las molasas Mio-Pliocenas, correspondientes a las Formaciones Parángula y Río Yuca. Se observan terrazas Cuaternarias correspondientes a la Formación Guanapa. En esa región, las molasas inferiores descansan en discordancia angular sobre los sedimentos marinos autóctonos del Eoceno Medio (Formación Pagüey). En las líneas sísmicas se observa claramente la discordancia que corresponde a la base de la molasa y que en este sector se observa en superficie, por el alto asociado al Anticlinal Las Garzas (**Figuras 3 y 8**).

Aguasuelos (1990) señala que la falla asociada al anticlinal Las Garzas es subvertical y presenta dos movimientos: uno inverso hacia el Sureste y otro transcurrente dextral. El Anticlinal Las Garzas, que se observa a simple vista en las líneas sísmicas del área, presenta una forma sigmoidal muy pronunciada; está orientado N50E y cambia en sus dos extremos a una orientación N80E. También se observa una estructura denominada Anticlinal de Morador, dibujado por las molasas de la Formación Río Yuca y en cuyo corazón afloran las lutitas con olistolitos Cretácicos de la Formación Río Guache, alóctona.

2. Un sector intermedio constituido por dos conjuntos separados por la falla Fila Agua Amarilla (**Figuras 3 y 9**): al Suroeste de dicha falla dominan los afloramientos del Eoceno Medio (Formación Pagüey Autóctona y Parautóctona) y al Noreste aflora las unidades alóctonas correspondientes a las Formaciones Río Guache y Barquisimeto. Es importante destacar, que el límite entre Pagüey Autóctono y Parautóctono, no se distingue con facilidad en los mapas de geología de superficie; sin embargo, se puede distinguir a través de las líneas sísmicas.

Hacia el Suroeste de la Falla Fila Agua Amarilla, se observa un afloramiento correspondiente al levantamiento originado por la Falla Cerro Azul (**Figuras 3 y 6**), que expone a superficie a las formaciones Eocenas, Cretácicas y Pre-Cretácicas. Esta falla cabalga hacia el NO, colocando al Complejo Granítico Cerro Azul, sobre rocas de la Formación Pagüey.

3. Un sector superior constituido por Basamento Paleozoico y remanentes de la cobertura Mesozoica y Terciaria, resultado del levantamiento Andino.

### **Modelo Estructural 3D**

Partiendo de las secciones estructurales convertidas a profundidad y balanceadas, se realizó un modelo estructural 3D, que permitió realizar la visualización de la geometría de las fallas y horizontes interpretados y verificar las trampas asociadas a los prospectos de Cerro Azul y Guaramacal.

En total se generaron 4 superficies, correspondientes a los topes de las formaciones Escandalosa, Gobernador (ambas consideradas reservorios), Pagüey y Parángula-Río Yuca. Además, se generó para cada falla, una superficie tridimensional que permitió verificar como funcionaban los contactos entre fallas, principalmente en aquellas de alta complejidad, como el caso de los contactos entre fallas normales pre-existentes y fallas inversas jóvenes, así como entre despegues y fallas de alto ángulo.



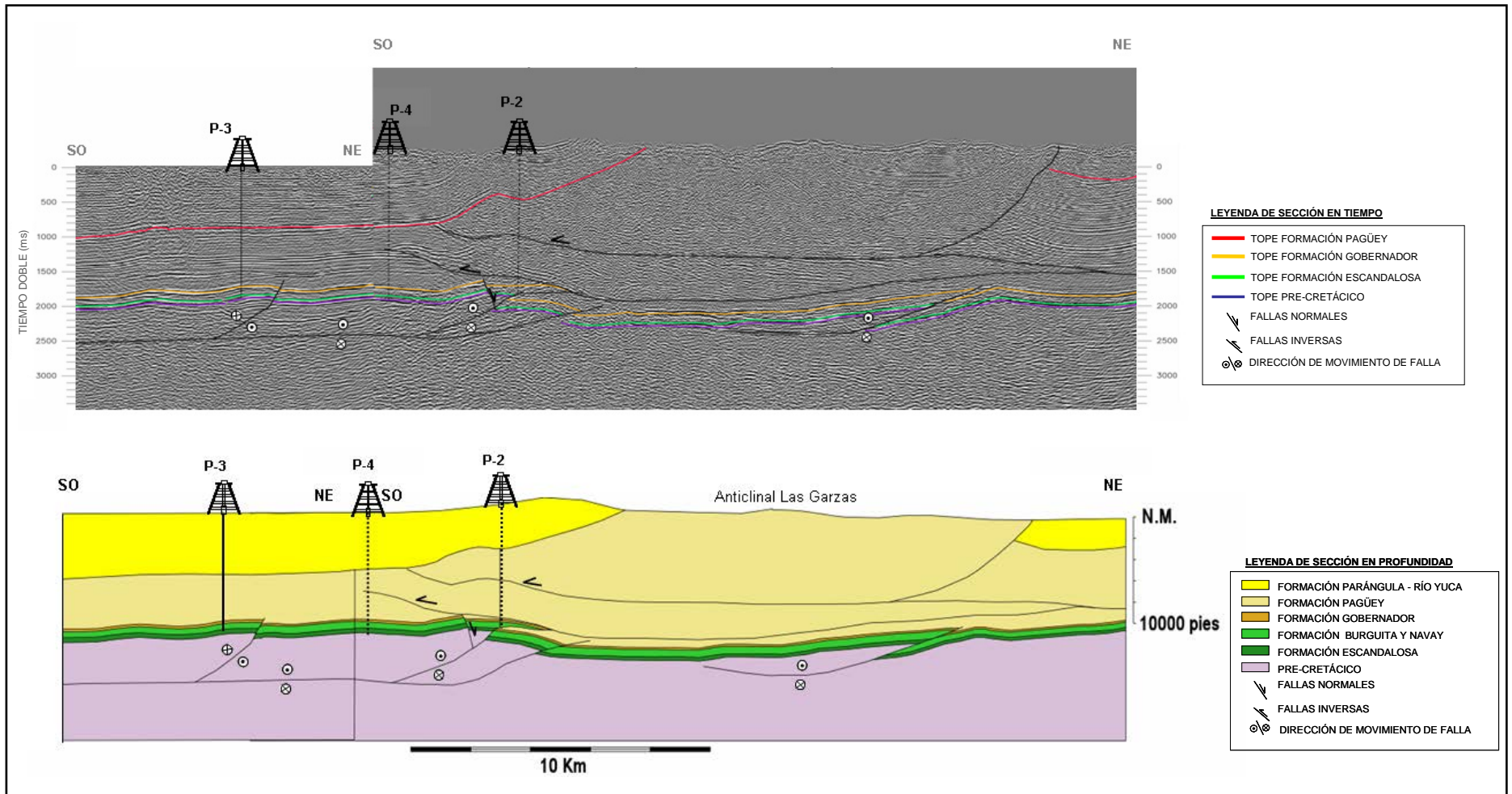


Figura 8. Línea Sísmica “C” interpretada, mostrando las estructuras perforadas por pozos del área y expresiones geológicas detectadas en sísmica y superficie.

Debido a que el modelo 3D se realizó con la información proveniente de líneas sísmicas 2D distanciadas, resulta difícil en algunos casos modelar con exactitud la geometría de las fallas, ya que la extensión de las líneas sísmicas hacia esa zona es irregular y está afectada por la existencia de embalses.

En la **Figura 11** se puede observar la geometría de las trampas asociadas a los prospectos 1 y 2 y demás áreas ya perforadas. La estructura del prospecto 1 resulta ser la más prospectiva en el área debido a su gran extensión.

### Evolución estructural

Varios eventos tectónicos son los responsables de la complejidad del área a nivel regional. En la **Figura 10** se muestra la evolución estructural del área, mediante la restauración de la línea sísmica “A”:

El Eoceno Temprano, está caracterizado por los depósitos de la Formación Gobernador y la presencia de fallas normales Pre-Cretácicas.

Durante el Eoceno Tardío-Oligoceno se deposita la Formación Pagüey y comienza el emplazamiento de las Napas de Lara desde el Noroeste, como consecuencia del avance de la colisión del arco insular en el Occidente (Colombia), pasando por el norte de la zona Maracaibo-Santa Marta. El emplazamiento de las Napas origina por colapso, la reactivación de las fallas normales preexistentes.

A partir del Mioceno se inicia la depositación de las formaciones Parángula y Río Yuca, durante el levantamiento andino, el cual se sobre-impone al estructuramiento Paleógeno y comienza el proceso de inversión de las fallas normales preexistentes. Durante las etapas tempranas de inversión, los grábenes se deforman siguiendo la trayectoria de estas fallas normales preexistentes; sin embargo, a medida que avanza la inversión estructural, la deformación se transmite hacia el frente de borde de graben al Sureste y se propaga en forma de fallas inversas de ángulo bajo. Estas fallas, ocasionalmente emergen hasta superficie y en algunos casos forman zonas triangulares dentro de sedimentos Miocenos y Eocenos. Estas estructuras invertidas corresponden a los prospectos 1 y 2. Este levantamiento continúa durante el Plioceno, generando el plegamiento de la Formación Pagüey Parautóctono y de las Formaciones Parángula y Río Yuca.

El acortamiento asociado a todo éste proceso evolutivo fue de 5 Km, a lo largo de la sección estructural.

### Prospectividad del área

Como se ha mencionado anteriormente, en el área se muestran evidencias de la presencia de estructuras propectivas desde el punto de vista exploratorio. En la **figura 9** se observa la línea sísmica “D” que muestra la trampa correspondiente al

prospecto 1, la cual se define como un pliegue limitado al Noroeste por dos fallas normales preexistentes, reactivadas durante el levantamiento andino, con componente, principalmente, transcurrente y hacia el Sureste, por una falla normal, con inversión positiva, con buzamiento Noroeste. Por otro lado, el prospecto 2, ubicado en la línea sísmica “B” (**figura 7**) esta identificado como una estructura definida por un pliegue de buzamientos suaves limitado hacia el Sureste por una falla normal principal de buzamiento Oeste, reactivada durante el levantamiento andino con inversión positiva y hacia el Noreste, por un retrocorrimiento asociado a la falla principal.

Un aspecto positivo del modelo estructural es que la presencia de fallas normales preexistentes, permite disminuir el riesgo de sincronización con el proceso de expulsión-migración de hidrocarburo ocurrido durante el Eoceno, ya que las mismas sirven de trampa para el primer pulso de generación de hidrocarburo desde las cocinas Eocenas presentes en el área.

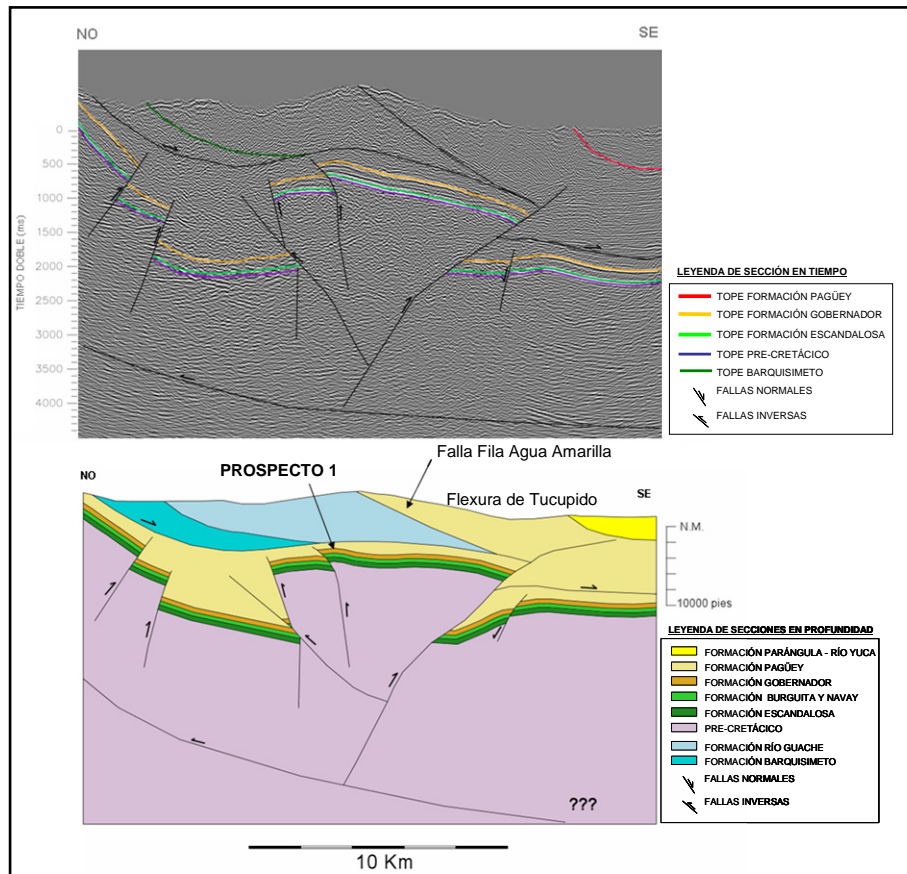
### Conclusiones

- La evolución estructural incluye un período extensivo durante el Eoceno Temprano en el que se reactivan las fallas normales antiguas. Para el Eoceno Tardío-Oligoceno, comienza el emplazamiento de las Napas de Lara desde el Noroeste y continúa el proceso de reactivación de fallas preexistentes. En el Mioceno, se inicia el levantamiento andino, el cual se sobreimpone al estructuramiento Paleógeno y comienza el proceso de inversión de las fallas normales antiguas y generación de fallas inversas puramente andinas.
- Se determinó un acortamiento total para la estructura del Flanco Surandino central de 5 km. aproximadamente.
- Las fallas antiguas representan un elemento importante dentro del proceso de generación de trampas efectivas, ya que permiten disminuir el riesgo de sincronización en el área.
- El nuevo modelo estructural generado permitió confirmar la prospectividad del Flanco Surandino, al identificar trampas estructurales, que forman bloques que aún no han sido perforados en el área.

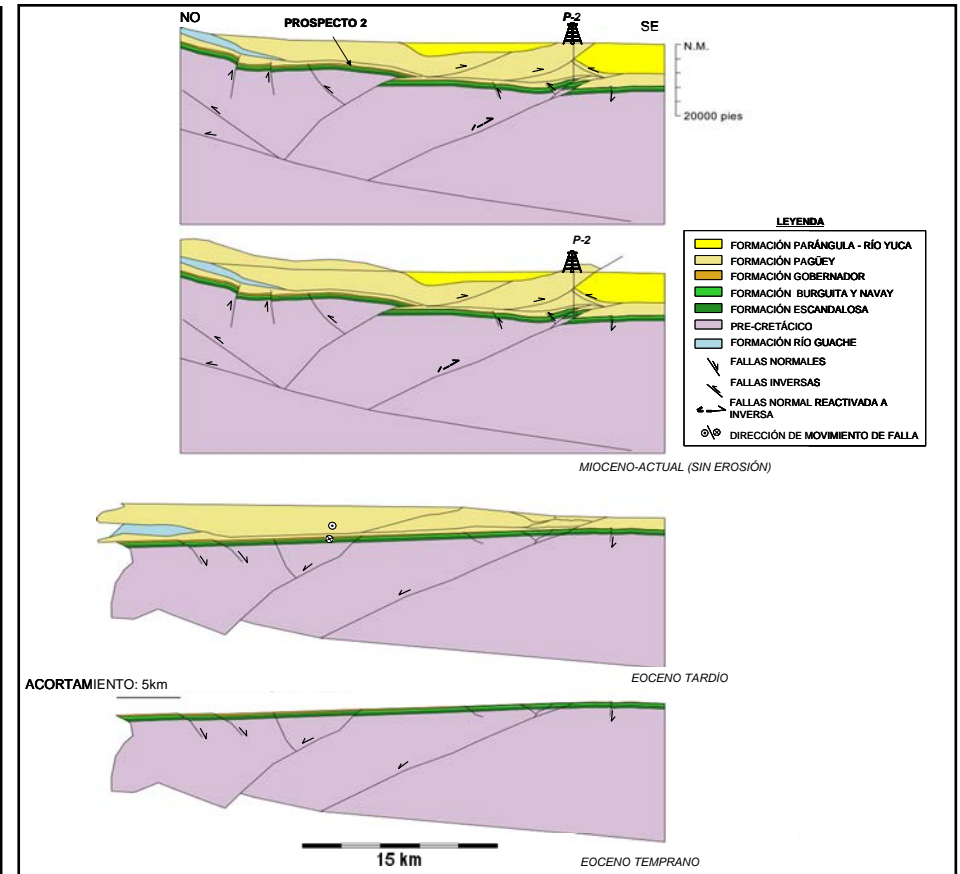
### Referencias

- Aguasuelos Ingeniería, 1990, Modernización de Datos Geológicos en el Frente de Montaña: Documento Técnico-Corpovent.
- De Toni B., Loureiro D., Colleta B., Roure F. y Márquez C., 1994, Análisis Geológico Integrado de las Cuencas de Barinas y Maracaibo. Síntesis Estructural: Documento Técnico PDVSA-Intevep.



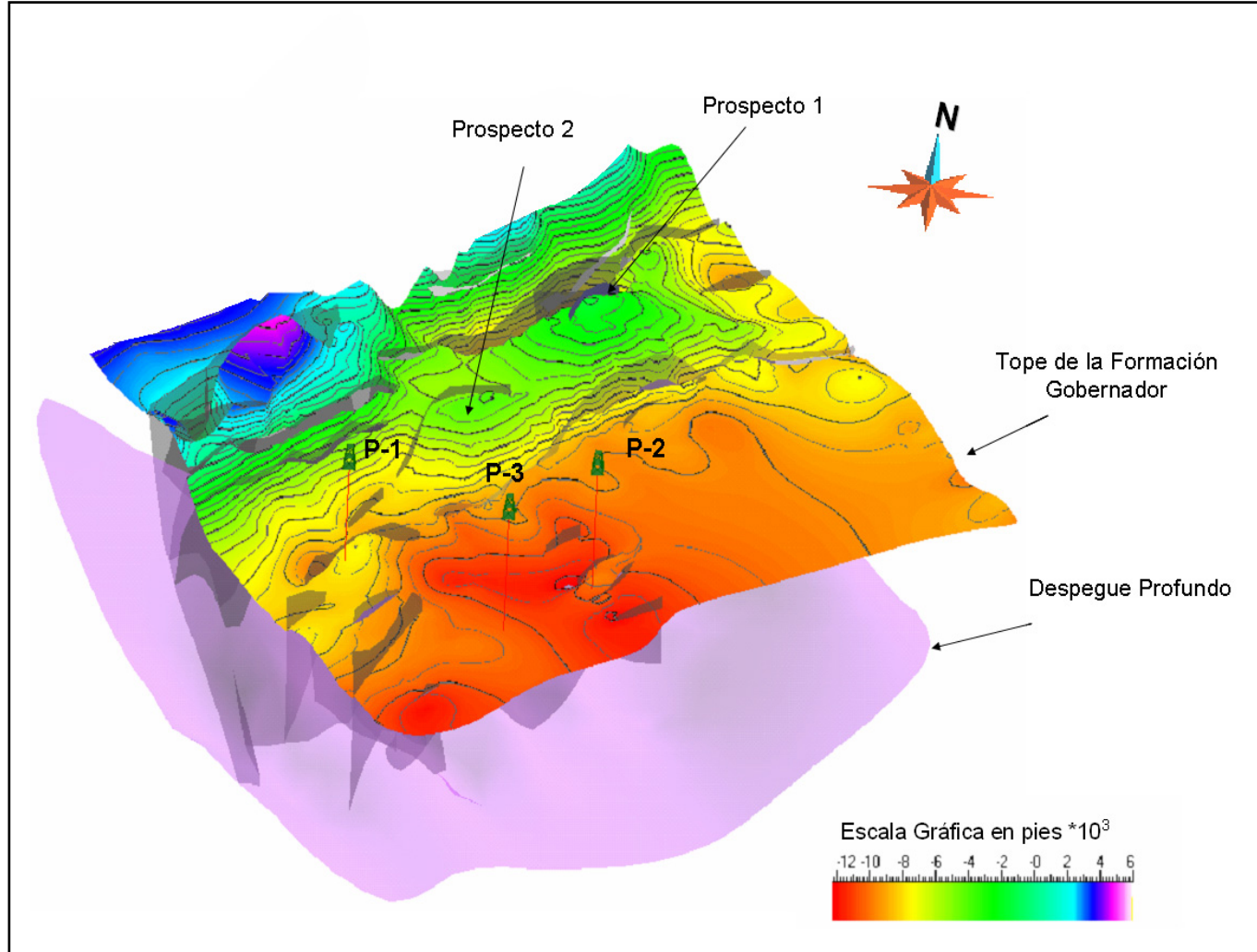


**Figura 9.** Línea Sísmica “D” interpretada, mostrando la trampa estructural asociada al prospecto 1.



**Figura 10.** Evolución Estructural del área.





**Figura 11.** Modelo Estructural 3D del área.

- González A., Fuentes J., Hernández V., Mónaco M. y Lander R., 1994, Estilos Estructurales en el Flanco Surandino Sector Barinas – Portuguesa Oeste: Documento Técnico PDVSA-Corpovent, Gerencia de Exploración.
- De Toni, B. Rivero 1996, Síntesis Estructural del Sector Centro-oriental del Flanco Surandino: Documento técnico PDVSA-Intevep.
- Mujica A., Berge T., González A., Issa N., Rengel M. y Serrano O., 1997, Estudio del Área de Barinas Norte y Flanco Surandino. Cuenca Barinas-Apure, Venezuela: Documento Técnico PDVSA-Corpovent, Proyecto FACIEX, Gerencia de Exploración.
- Eichenseer H., de Urreiztieta M. y Rider O., 1997, Guanare Block (Western Venezuela) Geology Study: Documento técnico Elf Exploration Production/ CONOCO.
- Dueto, L., 1998, Principales zonas triangulares del occidente de Venezuela: Trabajo de grado.
- Audemard F. E. y Audemard F. A., 2001, Structure of the Merida Andes, Venezuela: relations with the South America – Caribbean geodynamic interaction: Tectonophysics 345, pp 299-327.
- Nevado M., Nieves A., Fernández A., Freddy J., Berbesi B. y Milangela M., 2004, Interpretación integrada de datos Gravimétricos y magnéticos para el Flanco Surandino: Documento técnico PDVSA-Intevep.
- Repsol YPF, 2004, Participation Proposal. Barrancas Block, Barinas Basin, Western Venezuela.
- Jácome M., Chacín L. e Izarra C., 2005, Flexural and gravity modelling of the Mérida Andes and Barinas-Apure basin, Western Venezuela: Tectonophysics 405, pp 155-167.
- EFAI, 2006, Estudio Integrado de Sistemas Petrolíferos Venezuela Occidental, Apure-Barinas: PDVSA, BeicipFranlab y Equipo de Estudio y Formación Acelerada de Integradores. Capítulo 3: Estructural.
- EFAI, 2008, Estudio Integrado de Sistemas Petrolíferos Venezuela Occidental, Apure-Barinas: PDVSA, BeicipFranlab y Equipo de Estudio y Formación Acelerada de Integradores.