

EVOLUCIÓN TECTÓNICA, PROVINCIAS ESTRUCTURALES Y SECUENCIAS TECTONO-ESTRATIGRÁFICAS DEL PIEDEMONTES DE LA CUENCA PUTUMAYO, COLOMBIA

Yucet Fechi¹, Guillermo Rossi², Nicolás Rodríguez³, Adriana Gómez⁴, Agustina Etcheverry⁵

1: GeoPark Colombia SAS. yfechi@geo-park.com

2: GeoPark Colombia SAS. grossi@geo-park.com

3: GeoPark Colombia SAS. narodriguez@geo-park.com

4: GeoPark Colombia SAS. agomez@geo-park.com

5: GeoPark Colombia SAS. aetcheverry@geo-park.com

Palabras clave: Orogenia Andina, Cuenca Putumayo, Inversión Tectónica, Fallas de Atajo, Evolución Tectónica

ABSTRACT

The Putumayo Basin Foothills corresponds to the northwestern corner of the Marañón-Oriente-Putumayo Megabasin (MOP) shared by Colombia, Ecuador and Perú. The area holds one of the giant fields in Colombia (the Orito Field with 1.5 billion barrels of oil in place) and has a complex structural history that challenges the exploration efforts. This study presents a structural model carried out over a zone in the Putumayo Basin foothills, integrating surface geology, 2D seismic and subsurface data from the Unicornio-1 well. The main purpose was to test new ideas related to the tectonic evolution of the Andean deformation front and its implications in the tectono-stratigraphic history and the petroleum systems involved. The interpreted model also provides an example of a deformation pattern that can be extrapolated to the whole leading edge of the western boundary of the Putumayo Basin. Features like single fault planes with normal and reverse displacement, stratigraphic thickening in some sequences at the hanging walls of faulted blocks, growing-strata anticlines, pop-up structures, shortcut thrust faults and juxtaposition of structures, allow to make a complete interpretation of the structural setting. Four main tectonic events and therefore four tectono-stratigraphic sequences were recognized as follow: (1) a Triassic to Upper Cretaceous extensional phase characterized by horst and graben systems and the accumulation of pre-extensional (Paleozoic to Lower Triassic) and syn-extensional (Upper Triassic to Upper Cretaceous) depositional sequences, (2) a Lower Eocene Pre-Andean Orogeny, with incipient fault inversion processes resulting in a subtle structural relief responsible for the onset of hydrocarbon trap generation and the deposition of post-extensional (Paleocene) and syn-inversion (Eocene to present) sedimentary sequences, (3) a Upper Oligocene to Upper Miocene deformation event (main Andean Orogeny) with intense tectonic inversion evidenced by strong mountain building and the propagation of new thrust faults that triggers a second episode of hydrocarbon trap generation, and (4) a Pliocene (~3Ma) late Andean deformation event causing a transpression regime evidenced by dextral strike-slip displacement clearly identified on surface structures.

INTRODUCCIÓN

La sub-cuenca “Caguán-Putumayo” se encuentra ubicada en el extremo norte de la Megacuenca Marañón-Oriente-Putumayo (MOP) (Fig. 1; Barrero *et al.* 2007).

La evolución geológica del MOP se desarrolló durante diversos episodios tectónicos que transformaron su origen desde una cuenca de tipo *rift* de edad Triásico-Jurásico, pasando por cuenca de retroarco durante la mayor parte del Cretácico, finalizando el Mesozoico como una cuenca de tipo *foreland* a partir del Maastrichtiano tardío. Por último, fue afectada por la Orogenia Andina en el Mioceno tardío (Aguilera 2006). Debido a esta multiplicidad de eventos tectónicos, la megacuenca de MOP se caracteriza por una importante complejidad geológica y estructural originada por tres episodios tectónicos mayores: (1) la subducción de la Placa de Farallón (Lonsdale 2005) bajo la Placa Sudamericana, (2) la colisión acompañada de subducción oblicua y de bajo ángulo de la Dorsal de Carnegie por debajo de la Placa Sudamericana y (3) la formación de la Mega cizalla Guayaquil-Caracas (Pachón 2013) (Fig. 1).

El primer descubrimiento de petróleo fue en el año 1963 con el pozo Orito-1 (Montenegro y Barragán 2011). A pesar de que las actividades exploratorias comenzaron a finales de los años 40, la cuenca de Putumayo presenta una madurez exploratoria muy baja (un pozo cada 155 km² en promedio) por lo que puede considerarse una cuenca subexplorada. La misma puede considerarse como oil prone, ya que el 86% de los campos producen hidrocarburos líquidos, con un promedio por campo de 19 millones de barriles y un chance de éxito promedio del 15 al 20%.

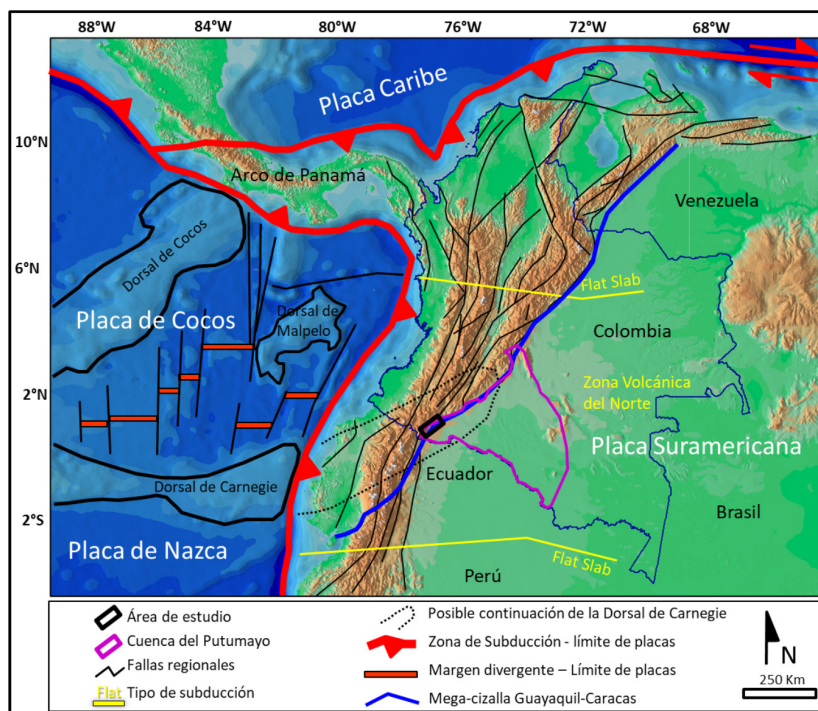


Figura 1. Mapa tectónico regional (modificado de Pachón 2013).

Algunos estudios regionales se han llevado a cabo, sobre todo en la zona del frente de corrimiento (*foreland*), pero, desafortunadamente, la mayoría de los estudios son reportes inéditos que permanecen como informes internos dentro de las compañías privadas.

OBJETIVOS Y ALCANCE

Teniendo en cuenta la falta de estudios disponibles mencionada en el punto anterior, se elaboró un modelo estructural evolutivo para el Piedemonte Andino en el marco de un proyecto de investigación para mejorar el conocimiento de los mecanismos de deformación, la generación de las estructuras y el timing de las mismas. El siguiente trabajo forma parte de la Tesis de Maestría del

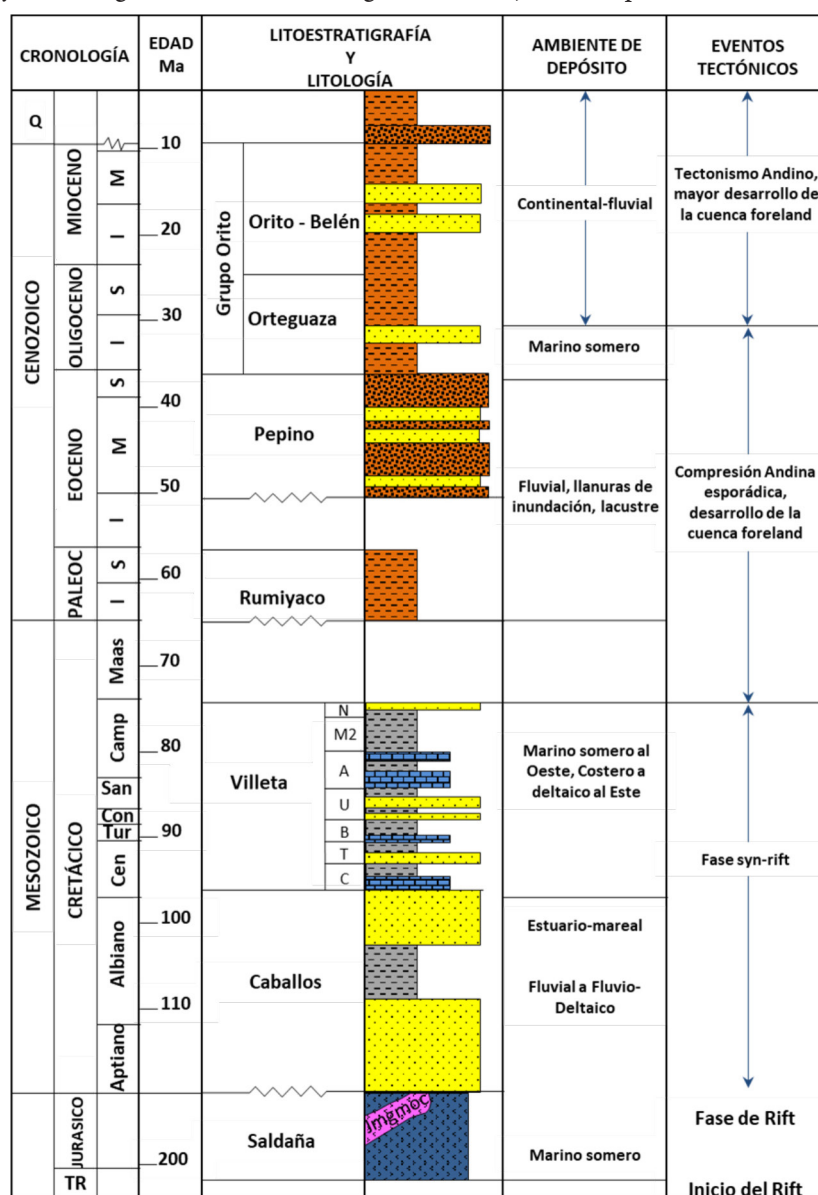


Figura 2. Columna estratigráfica (tomada de Fechi 2016)

autor principal (Fechi 2016). El foco de este trabajo se desarrolló en la zona de Piedemonte Andino ubicada al oeste de la Cuenca de Putumayo y comprende un área aproximada de 994 km² (Fig. 1).

A partir de este modelo, se desarrollaron argumentaciones tectono-estratigráficas y se derivaron las implicaciones que estas tendrían para la prospección de hidrocarburos en el entorno del área analizada.

La estratigrafía de la zona comprende rocas del Mesozoico inferior al Cuaternario, y se caracteriza por el desarrollo de diferentes paleoambientes sedimentarios que obedecen a los múltiples eventos tectónicos (Ingeominas 2003) que se muestran de manera resumida en la Figura 2.

EVOLUCIÓN GEODINÁMICA

Para comprender las características del área de estudio es necesario localizar su posición en el entorno global y los procesos que la han afectado a partir de la tectónica de placas y la dinámica global. Para esto se ha utilizado como referencia regional el modelo de Van Der Pluijm y Marshack (2004) (Fig. 3) y como referencia local al de Pachón (2013) (Fig. 4).

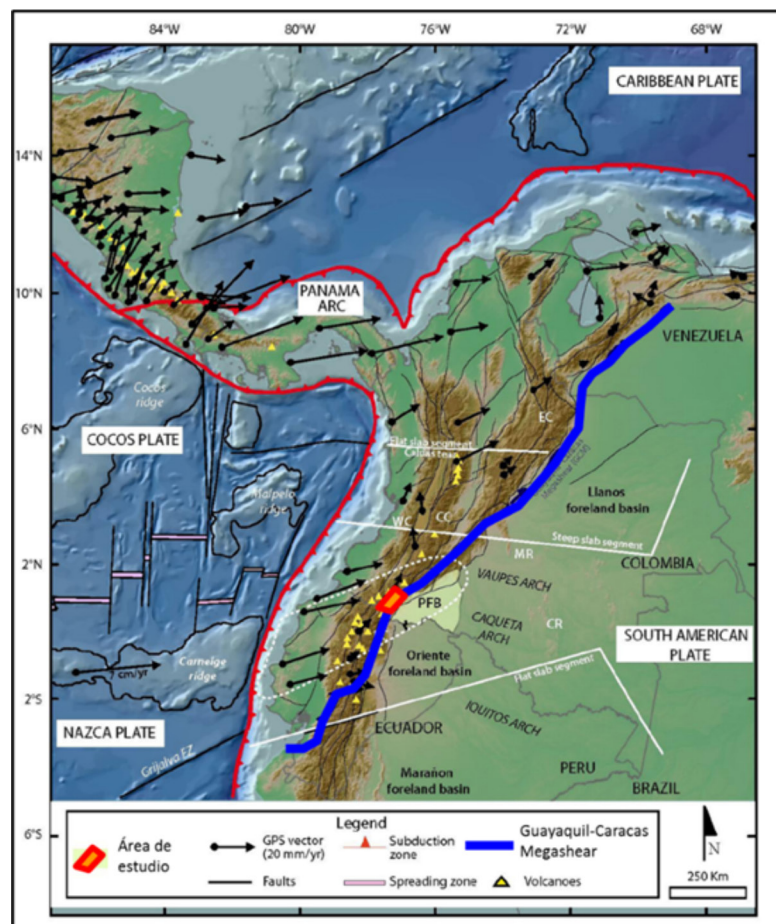


Figura 3. Esquema morfo-tectónico de la parte NW de Sudamérica con elementos principales y datos de geoposicionamiento global (modificado de Pachón 2013).

Para el modelado local, se analizó además la información publicada de los cinturones de cabalgamiento andinos más cercanos al área de estudio: (1) Piedemonte de la Cuenca de los Llanos, relacionado a sistemas de rift Jurásicos que fueron invertidos durante la Orogenia Andina (Cooper *et al.* 1995; Rowan y Linares 2000; Martínez 2006; Mora 2007), (2) Cuenca del Valle del Magdalena, formado a partir de procesos similares al del piedemonte de la Cuenca de los Llanos (Caballero *et al.* 2013 y Moreno *et al.* 2013) y (3) Cuenca Oriente en Ecuador formada por la inversión tectónica de sistemas de rift de edad Triásico-Jurásico con diferentes pulsos compresivos comenzando en el Albiano y culminando en el Mioceno (Baby *et al.* 1999).

METODOLOGÍA

Este trabajo contempló cuatro fases principales que se explican a continuación:

Fase 1: Recopilación de información: Se analizaron datos provenientes de geología de superficie (Ingeominas 2001), DEM SRTM 30x30, el pozo Unicornio-1 además de 5 secciones sísmicas 2D como se muestra en la Figura 4.

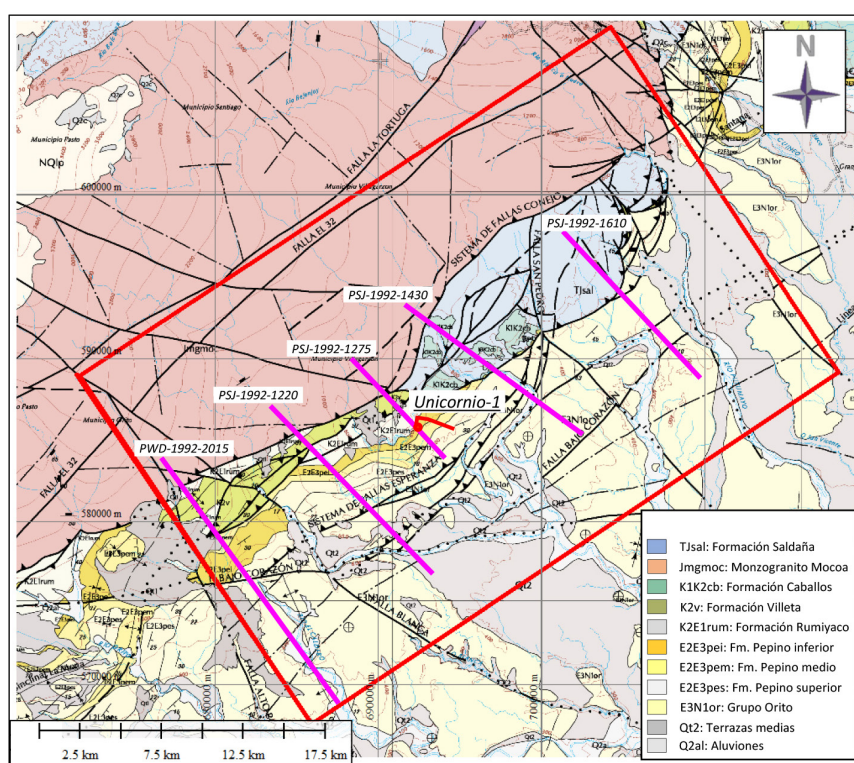


Figura 4. Mapa Geológico y ubicación de las secciones sísmicas y del pozo utilizado (véase la Figura 1 para la ubicación).

Fase 2: Carga y control de calidad: Análisis, clasificación, carga de datos, control de calidad, calibración y amarre. Entre otros, se calculó la dirección de transporte tectónico con base en datos estructurales de superficie.

Fase 3: Interpretación y evaluación: Se generó un mapa geológico de superficie ajustado a la interpretación de la información sísmica y de pozo. Se interpretaron y convirtieron a profundidad las secciones sísmicas. Posteriormente se continuó con el modelado directo, balanceo de las secciones y la interpretación del ambiente tectónico para el área.

Fase 4: Discusión de resultados y conclusiones: Se plantea una evaluación tectono-estratigráfica y sus implicaciones en el sistema petrolífero y en futuras evaluaciones de prospectividad en el área de piedemonte andino en la Cuenca del Putumayo.

RESULTADOS

Mapa Geológico

El primer resultado de este estudio fue un mapa geológico de superficie en el cual se integró la interpretación existente con la información proveniente de los datos de sísmica 2D y de pozo. A partir de allí, se identificaron los rasgos estructurales principales (Figs. 4 y 5): (1) Sistema de Fallas de Conejo (SFC): falla principal que corresponde al frente de cabalgamiento de los Andes y tiene un rumbo aproximado SO-NE. (2) Falla La Mona: falla inversa subparalela al SFC. Coloca a la Formación Villeta (Cretácico) sobre la Formación Rumiyaco (Paleoceno). (3) Falla Esperanza:

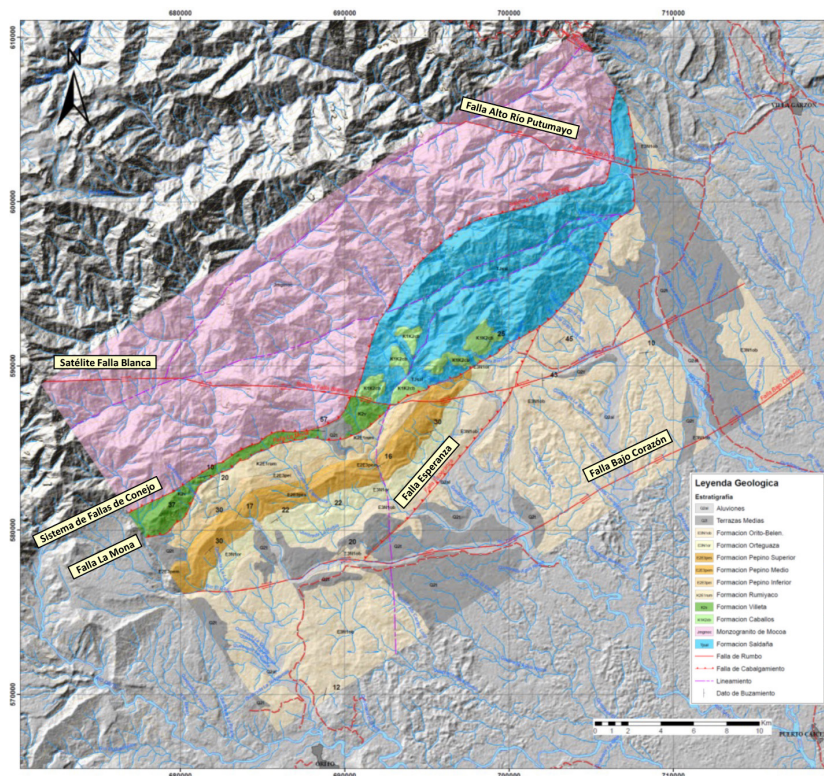


Figura 5. Mapa geológico del Piedemonte del Putumayo en el área de estudio (modificado de Fechi 2016; véase la figura 1 para la ubicación).

falla inversa de rumbo SSO-NNE, cortada por la Falla La Mona al norte y la Falla Bajo Corazón al sur. (4) Falla Bajo Corazón: falla de rumbo dextral que controla el trazo del Río Conejo. (5) Satélite Falla Blanca: falla de rumbo dextral cuyo trazo ingresa al área de estudio por el occidente, en dirección casi O-E y constituye la terminación Norte del afloramiento de la Formación Villeta y en su recorrido controla el trazo del Río Vides. (6) Falla Alto Río Putumayo: falla de rumbo dextral con rumbo NO-SE, que controla el curso del Río Putumayo.

Secciones estructurales

Haciendo un análisis de los datos de rumbo y buzamiento, se determinó que la dirección de transporte tectónico es de 138° , muy similar a la orientación de las secciones sísmicas interpretadas que varían entre 127° y 145° , con tres secciones en dirección 137° . Las secciones sísmicas fueron interpretadas en tiempo siguiendo ocho unidades litoestratigráficas de interés, un ejemplo se muestra en la Figura 6.

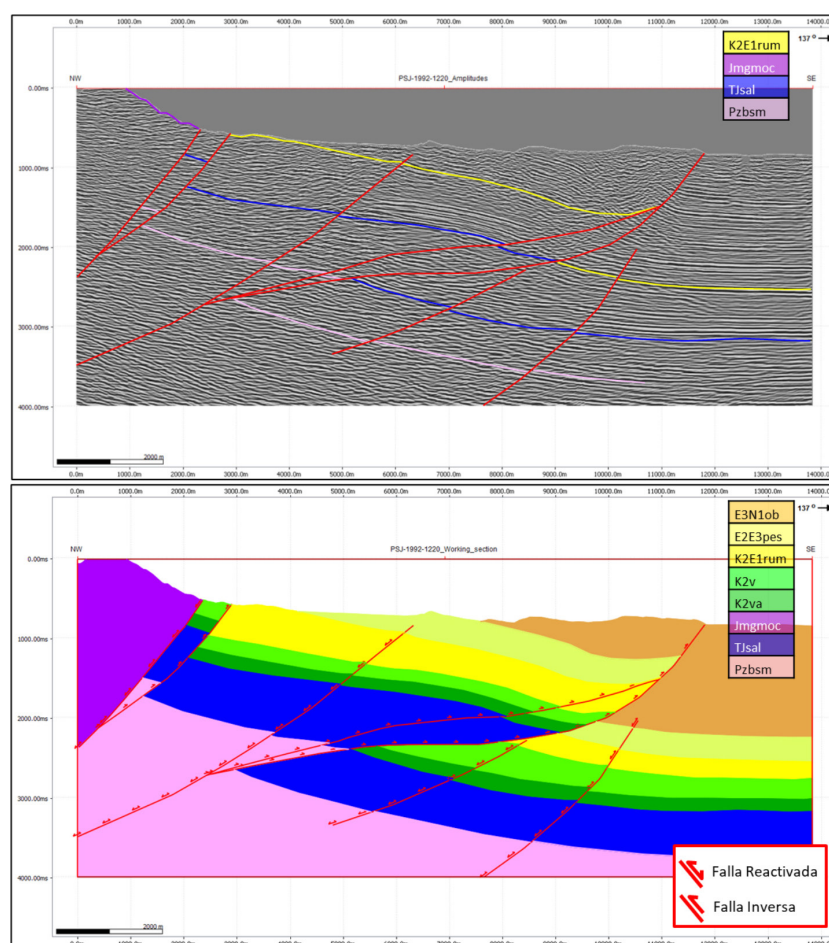


Figura 6. Sección sísmica PSJ-1992-1220 en tiempo. Escala Horizontal en metros y vertical en milisegundos (1:3) (véase la Figura 4 para la ubicación).

Posteriormente fueron convertidas a profundidad usando el módulo de conversión a profundidad de Move Suite® incluyendo datos de propiedades físicas para cada unidad. Una explicación detallada del proceso de conversión se encuentra en Fечи (2016).

Las líneas convertidas a profundidad fueron utilizadas en el modelado directo y balanceo. Se excluyeron las unidades intrusivas o que no tienen datos de tope y presencia en toda el área (Monzogranito de Mocoa y el Grupo Orito) y se respetaron las relaciones estratigráficas y los espesores definidos en cada bloque tectónico de las unidades erosionadas (Fig. 7).

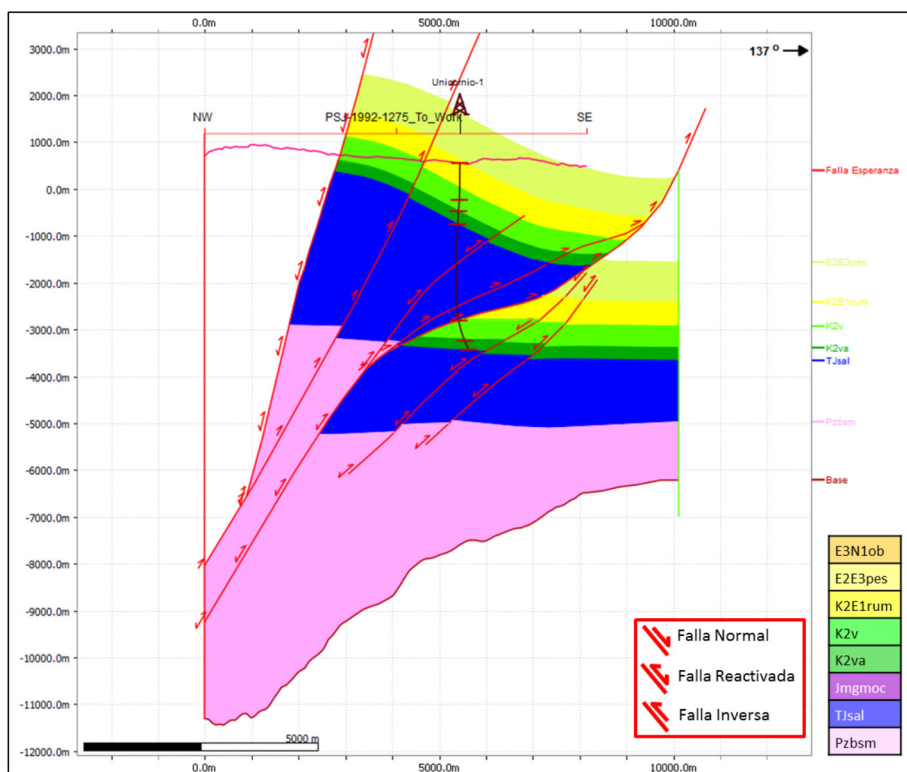


Figura 7. Sección PSJ-1992-1275 ajustada. Escala 1:1 (H:V) en metros (véase la figura 4 para la ubicación).

Retrodeformación y balanceo

La retrodeformación se realizó en secciones 2D, usando cizalla simple que es confiable para geometrías de fallas normales y permite además modelar sistemas de inversión tectónica. Cada horizonte se restauró a su estado no deformado y se llevó a un *datum* para calcular la decompactación. La Figura 8 muestra el ejemplo de la sección PSJ-1992-1275 y la Tabla 1 resume los datos de acortamiento calculados al tope del Jurásico.

SECTION	DIRECTION	SHORTENING
PWD-1992-2015	145°	6.9%
PSJ-1992-1220	137°	18.9%
PSJ-1992-1275	137°	24.2%
PSJ-1992-1430	127°	26.6%
PSJ-1992-1610	137°	20.5%

Tabla 1. Datos de dirección y acortamiento tectónico medidos.

De los resultados se encuentra un valor de acortamiento similar en la mayoría de las secciones, excepto por la sección PWD-1992-2015 al sur del área de estudio. Dicha diferencia se explica porque esta línea se encuentra, casi en su totalidad, en el bloque colgante de la Falla de Esperanza que es la estructura con el mayor rechazo del área y no cuenta con el acortamiento del bloque yacente (Figs. 4 y 5).

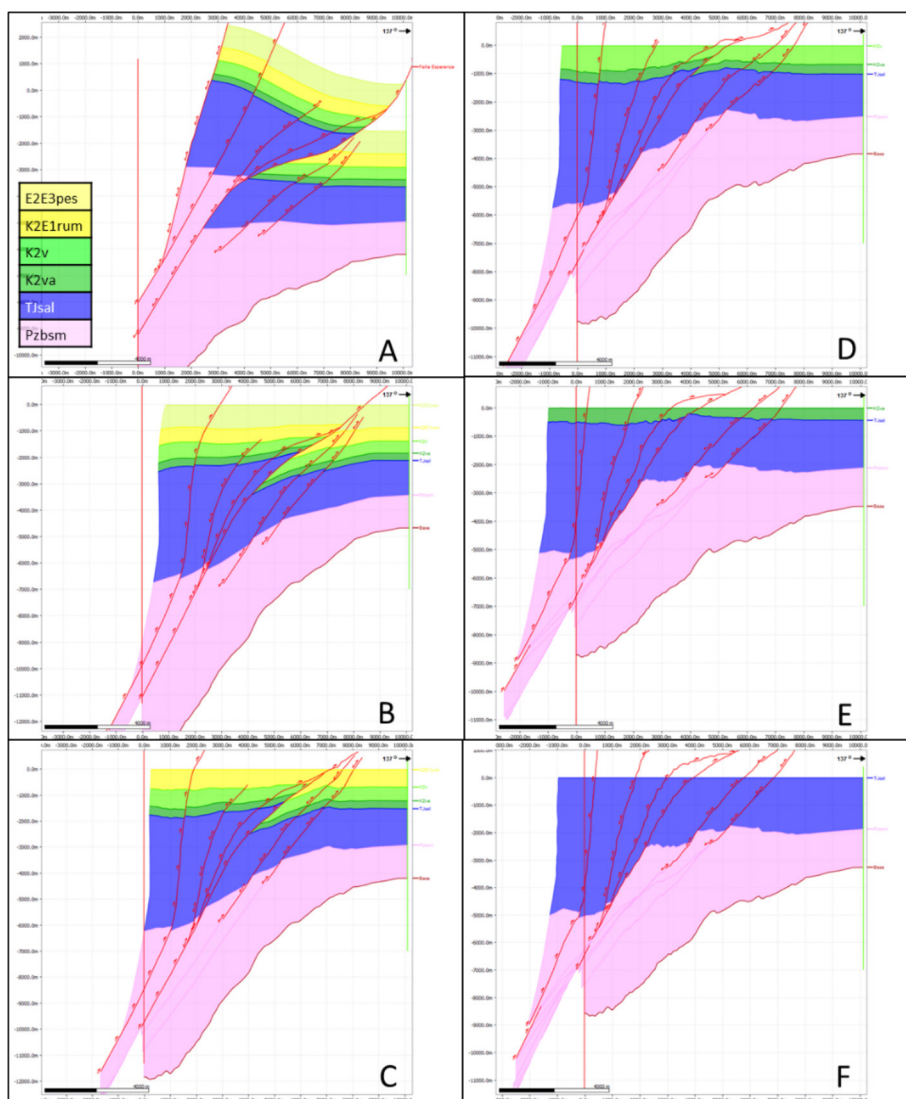


Figura 8. Retrodeformación y balance de la sección PSJ-1992-1275. (A) Sección inicial-actual, (B) Eoceno Superior, (C) Paleoceno Superior, (D) Campaniano-Maastrichtiano, (E) Santoniano, (F) Jurásico Superior. El acortamiento es de 24.2 % (véase la figura 4 para la ubicación).

Sistema de Inversión Tectónica

Basado en los resultados anteriormente citados, se realizó un modelado estructural de inversión tectónica, basado en la metodología de Nemcok *et al.* 2005. El modelo resultante concuerda con los propuestos para el entorno Andino más próximo (Cuencas de los Llanos al norte y de Oriente al sur) (Cooper *et al.* 1995; Baby *et al.* 1999; Rowan y Linares 2000; Martínez 2006; Mora 2007). Se encontraron diversos elementos diagnósticos de este tipo de sistemas estructurales: (1) la secuencia Sin-Extensión en el bloque colgante de las fallas reactivadas pueden presentar aumento en su espesor (Fig. 9 A), (2) la interpretación del carácter normal de la falla en la parte inferior de la secuencia Sin-Extensión y un desplazamiento inverso hacia el límite superior de la falla (Fig. 9 B), (3) anticlinales de crecimiento en la secuencia Sin-Inversión que muestran cerca del eje, un espesor más bajo que se va incrementando hacia los flancos en donde alcanza un valor máximo (Fig. 9 C), (4) un espesor relativamente constante en la secuencia Post-Extensión (Formación Rumiayaco) (Fig. 9 D), (5) horizontalización del plano de falla invertido en las secuencias Post-Extensión o

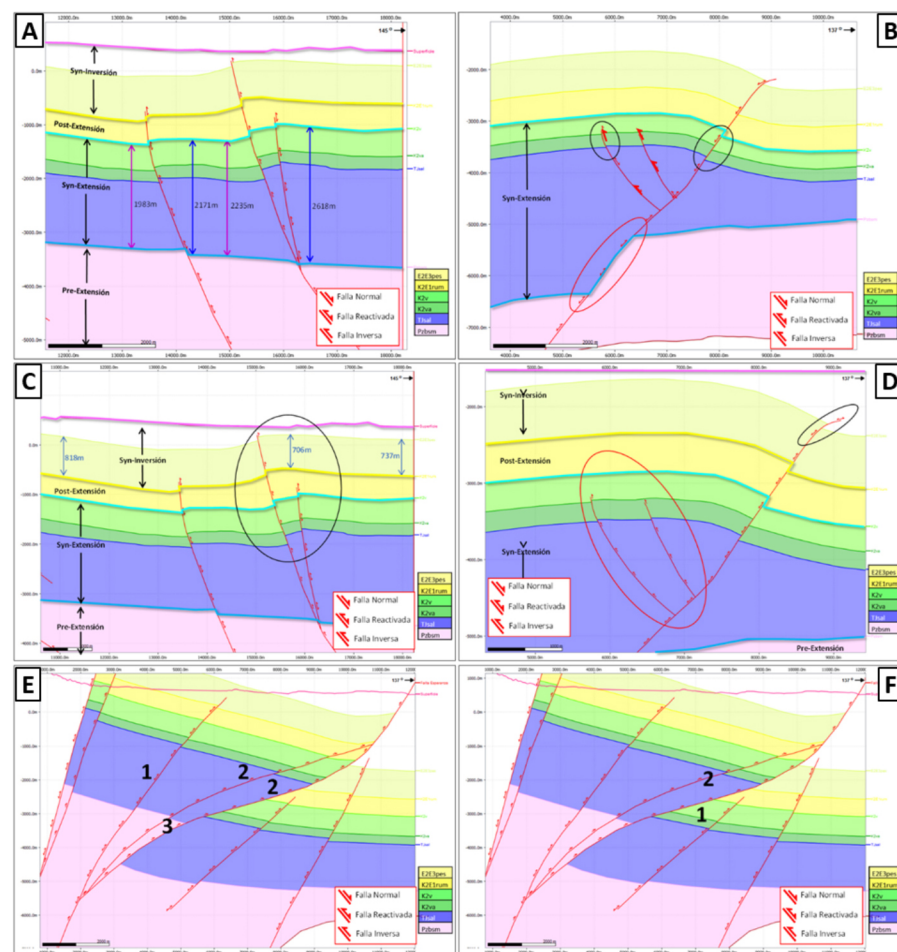


Figura 9. Elementos de sistemas de inversión tectónica identificados.

Sin-Inversión (Fig. 9 D), (6) Fallas antitéticas asociadas formando estructuras pop-up (Fig. 9 D), (7) Presencia de fallas de atajo para continuar la transferencia de esfuerzos, estas fallas son inversas y no estuvieron presentes en la fase extensional (Fig. 9 E) y (8) Yuxtaposición de estructuras debida a la presencia de fallas de atajo que actúan como cabalgamientos (Fig. 9 F).

Modelo Estructural Evolutivo

Se construyó un modelo estructural evolutivo para determinar el tipo, número y relación de eventos tectónicos que dieron origen a la estructuración actual. Se realizó en dos pasos: clasificando la estructuración actual y luego analizándola en el tiempo.

En primer lugar, en el área se reconocen tres dominios tectónicos principales de E a O (Fig. 10):

- (1) Profundo o de *foreland*,
- (2) Orito-Unicornio levantado por la Falla Esperanza y trazos asociados.
- (3) Conejo, levantado por el SFC.

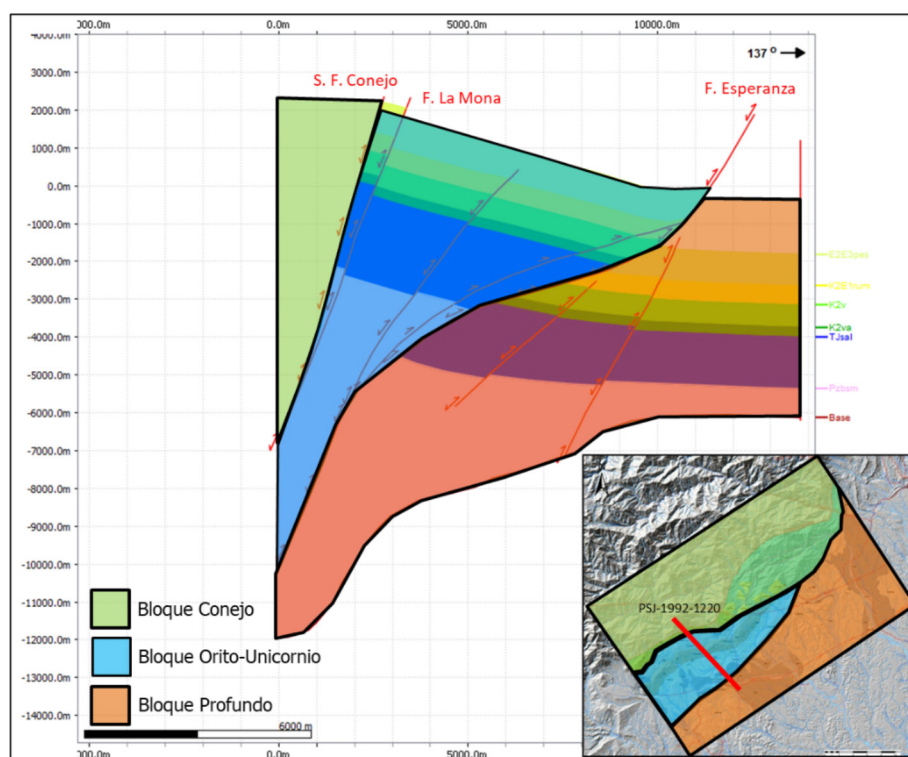


Figura 10. Dominios tectónicos en la sección PSJ-1992-1220.

Al interior de cada dominio se presenta fallamiento de tipo inverso y/o reactivado que es evidente en las secciones sísmicas y ayuda a distribuir parte del esfuerzo compresivo actuante y el acortamiento asociado como se evidencia en las figuras 7 y 10.

El modelo inicia con las rocas Pre-Jurásicas en una posición de no deformación hace aproximadamente 250 Ma. Luego comienza un proceso de fallamiento normal-*(rifting)* como consecuencia de la apertura del Mar de Tethys, creando espacios de acomodación y un sistema volcánico al occidente que genera los materiales depositados en el Jurásico (Fig. 11a). Se observa que el graben profundizaba hacia el norte y somerizaba hacia el sur. Esta configuración se mantuvo hasta finales del Jurásico.

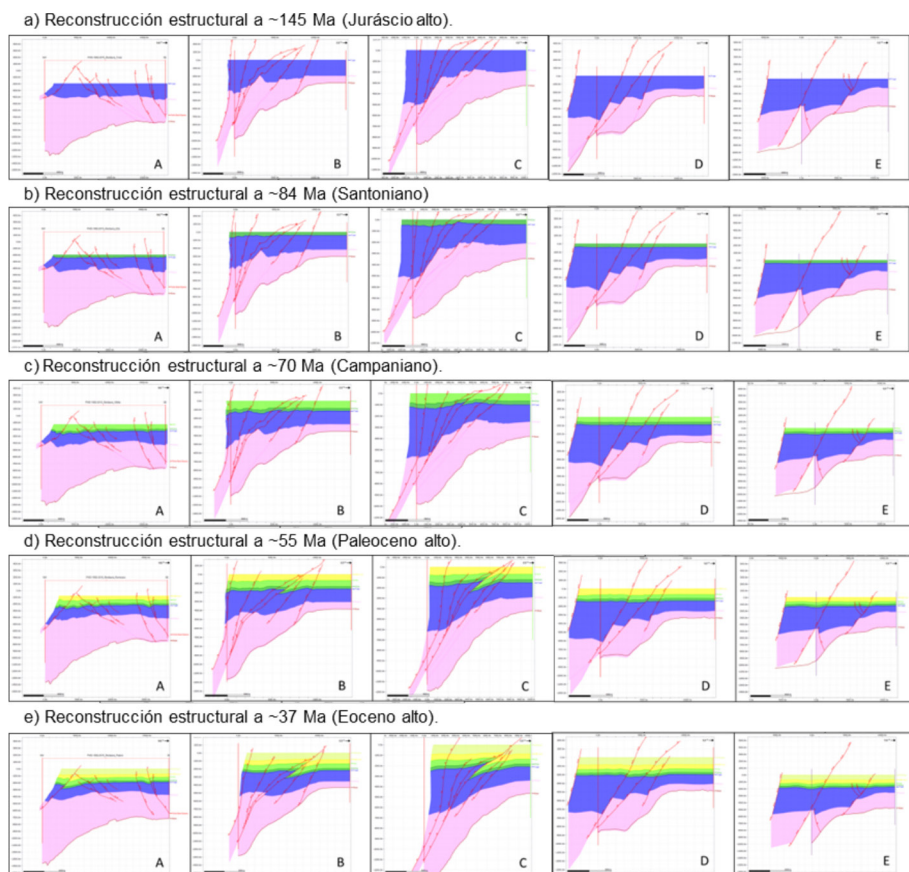


Figura 11. Modelos evolutivos de las secciones: (A) PWD-1992-2015, (B) PSJ-1992-1220, (C) PSJ-1992-1275, (D) PSJ-1992-1430 y (E) PSJ-1992-1610. Véase la figura 4 para la ubicación.

A comienzos del Cretácico, la tasa de sedimentación fue mayor que la de movimiento de las fallas para esta parte de la cuenca, ocasionando la colmatación de los depocentros. Al norte, en las Cuencas de Cundinamarca y Magdalena-Tablazo, para este tiempo inició una transgresión marina con registro sedimentario del Cretácico basal (Berriasiano-Valanginiano) (Fechi 2004).

En el Aptiano-Albiano la transgresión marina inunda la Cuenca del Putumayo depositando la Formación Caballos sobre el Jurásico y luego, la Formación Villeta. Para el siguiente nivel de la retrodeformación se escogió el nivel Caliza A (Santoniano) dentro de la Formación Villeta (Fig. 11b).

El tope de la Formación Villeta (Campaniano) marca el final de la fase extensional y es usado en el balanceo, debido a su implicación tectónica, marcando el final de la secuencia Syn-Extensión (Fig. 11c).

Durante el Paleoceno se produce una regresión marina y finaliza la influencia del fallamiento normal, generando un periodo de estabilidad tectónica en el que se acumula la Formación Rumiyaco en ambientes continentales (secuencia Post-Extensión). Esta unidad tiene un espesor relativamente constante (500 m aproximadamente) y solo se ve afectada por fallamiento durante la fase posterior de inversión tectónica (Fig. 11d).

En el Eoceno Inferior se presenta un episodio compresivo conocido como Orogenia Pre-Andina (Urueta y DuToit 1997; Goncalves *et al.* 2002) produciendo una discordancia regional sobre la que se deposita la Formación Pepino que inicia la secuencia Sin-Inversión. Las implicaciones de este evento son: reactivación de algunos planos de falla de la fase de rift (generando anticlinales de crecimiento limitados en uno de sus flancos por una falla reactivada) y variación del espesor de la Formación Pepino a partir del núcleo de los pliegues (Fig. 11e).

La fase Syn-Inversión continúa con el depósito del Grupo Orito (Oligoceno a Mioceno). En el Oligoceno Superior inicia la Orogenia Andina, que incrementa el proceso de reactivación de las fallas previamente desarrolladas. Posteriormente, en el Mioceno Superior, al producirse el máximo pulso de levantamiento, la reactivación de las fallas da paso a la generación de fallas de atajo que ayudan a transmitir los esfuerzos en zonas donde el plano original de la falla reactivada se verticaliza.

Desde hace aproximadamente 3 Ma el área ha sido afectada por un esfuerzo compresivo (que podría denominarse Andino tardío), que tiene una dirección de transporte con un azimuth de alrededor de 80° (Pachón 2013), originado por el cambio en la dirección de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa suramericana. Esto conduce a la continuación de la inversión tectónica con un nuevo componente de rumbo dextral.

Evolución Tectonoestratigráfica

Las unidades litoestratigráficas fueron incluidas dentro del modelo estructural identificándose 4 fases tectonoestratigráficas ilustradas en la Tabla 2 y la Figura 12. Detalles de cada una de estas secuencias y su evolución se presentan en Fechi (2016):

- (1) **Pre-extensión:** Basamento Paleozoico (?) al Triásico inferior,
- (2) **Syn-extensión:** Triásico superior-Jurásico hasta el Cretácico Superior,
- (3) **Post-extensión:** Entre las discordancias del límite Cretácico-Terciario y del Eoceno
- (4) **Syn-inversión:** Las unidades post-Eocenas.

FORMACIÓN	EDAD	Ma	TECTONOESTRATIGRAFÍA
Orito-Belén	Mioceno	23 - 5.3	Syn-inversión
Orteguaza	Oligoceno	31 - 23	
Pepino	Eoceno Medio-Superior	41 - 37	
Rumiyaco	Paleoceno	65 - 55	Post-extensión
Villeta	Cenomaniano-Campaniano	99 - 70	Syn-extensión
Caballos	Aptiano-Albiano	125 - 99	
Monzog. de Mocoa	Jurásico Superior	161 - 145	
Saldaña	Triásico-Jurásico	251 - 145	
Indeterminado	Paleozoico?	> 251	Pre-extensión

Tabla 2. Secuencias tectonoestratigráficas.

En el área analizada en este trabajo se identificaron cuatro eventos tectónicos:

(1) **Rifting:** (Triásico -o anterior- hasta el Campaniano) generó depocentros en los que se acumuló la Secuencia Sin-Extensión. La falta de sedimentación del Cretácico Inferior se debe a la acción de esfuerzos compresivos al occidente,

(2) **Pre-Andino:** (Eoceno Inferior). Primer pulso compresivo que produjo estructuración incipiente y sirvió como trampa para un primer pulso de migración de hidrocarburos Pre-Eocena,

(3) **Orogenia Andina:** Principal levantamiento de la Cordillera Oriental evento tectónico más importante del área y que continúa el proceso de inversión, favoreciendo procesos de remigración de crudos y acumulación en nuevas trampas,

(4) **Andino Tardío:** (Plio-Pleistoceno ~3 Ma). Fallas de rumbo dextral, favorecieron un segundo proceso de remigración y compartimentalización de las estructuras previas.

CONCLUSIONES

La evolución tectónica del área de Piedemonte de la Cuenca de Putumayo se obtuvo mediante un modelo que comenzó con un sistema de rifting Triásico-Jurásico que se vio afectado por dos eventos de inversión tectónica (Eoceno medio y Oligoceno Superior-Mioceno Superior) y posteriores esfuerzos transpresivos (Plio-Pleistoceno). En el marco de dicho modelo se diferencian 4 secuencias tectono-estratigráficas: (1) Pre-Extensión, (2) Sin-Extensión, (3) Post-Extensión y (4) Sin-Inversión.

Adicionalmente, se interpretaron 4 eventos tectónicos principales sobreimpuestos entre sí: (1) Rifting (Triásico-Campaniano) responsable de los grabenes donde se acumuló gran parte de la secuencia sedimentaria del área analizada, (2) Pre-Andino (Eoceno Medio) que inició una reactivación incipiente de los sistemas de fallas previos, (3) Orogenia Andina (Oligoceno Superior-Mioceno Superior) que continuó la reactivación de fallas preexistentes y dio paso a la generación de nuevas fallas inversas y (4) Andino Tardío (desde hace ≈3 Ma – actualidad) como un evento

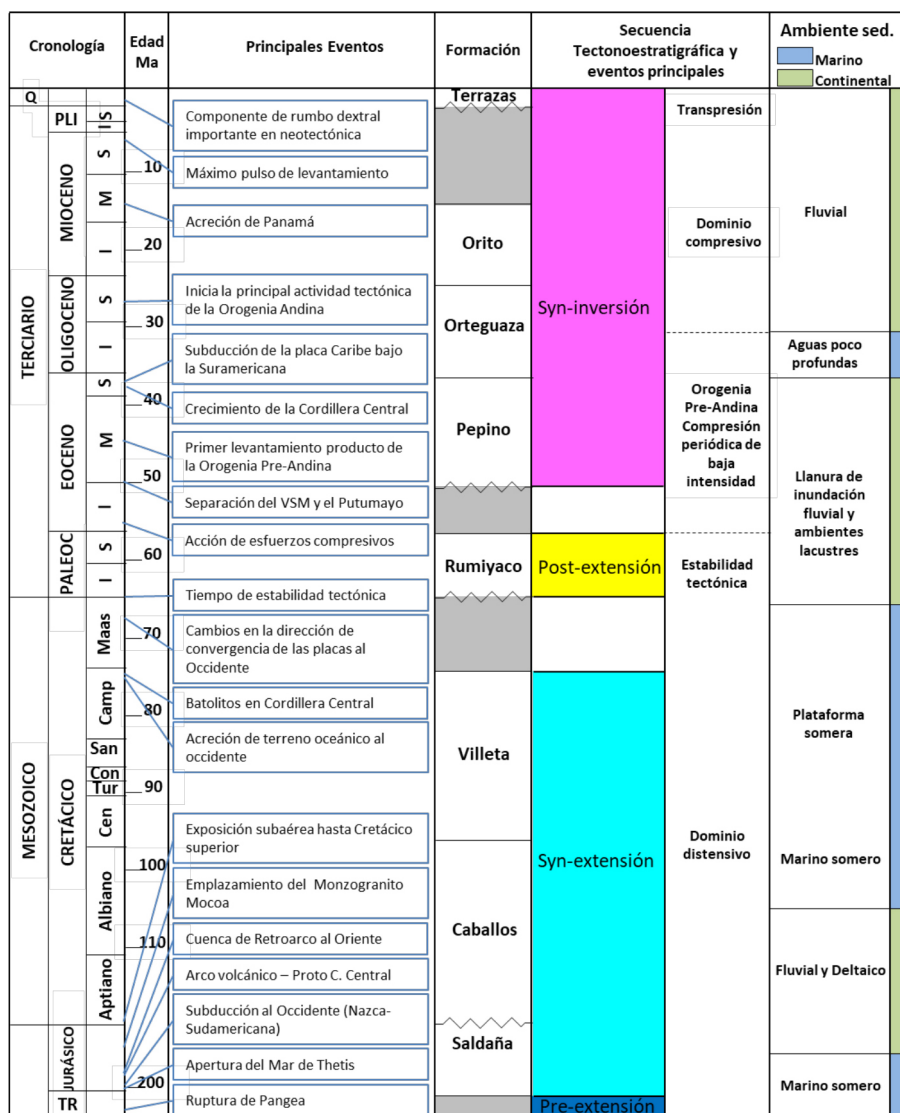


Figura 12. Carta de eventos y evolución tectono-estratigráfica (tomada de Fechi 2016).

compresivo-transpresivo con una dirección diferente al principal de la Orogenia Andina, que causa la generación de fallas de rumbo y/o la adición de un componente dextral a fallas inversas existentes.

Considerando las relaciones geométricas entre los sistemas de fallas y los niveles estratigráficos en la zona de estudio, es posible señalar que la fase de inversión del *rift* se inició en el Eoceno (al momento de la depositación de la Formación Pepino). Esto implica que en la historia evolutiva del Piedemonte Andino ya existían esfuerzos compresivos previos a la Orogenia Andina del Mioceno.

El resalto de los sistemas de fallas que limitaban los grabenes fue mayor en la parte central del área de estudio. Hacia el sur, los rechazos verticales fueron incrementándose, como puede evidenciarse por el aumento de los espesores de la secuencia del Aptiano-Maastrichtiano. Por otro

lado, la secuencia Sin-Extensión, compuesta por las Formaciones Saldaña (Jurásico), Caballos y Villeta (Aptiano a Campaniano) presenta variaciones de espesor considerables, como efecto del movimiento diferencial de las fallas normales en el tiempo.

En lo referente a la geología del petróleo, se puede concluir que el evento Pre-Andino (Eoceno Medio) fue formador de trampas estructurales cargadas por un primer pulso de migración de hidrocarburos en el Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (Goncalves *et al.* 2002). Posteriormente, el evento de la Orogenia Andina (Oligoceno Superior-Mioceno Superior), formó trampas estructurales nuevas cargadas por un segundo pulso de migración (Mioceno Superior-Plioceno) (Goncalves *et al.* 2002) y modificó las pre-existentes generadas por el evento Pre-Andino, produciendo fenómenos de remigración de hidrocarburos. El evento tectónico Andino Tardío, produjo compartimentalización de estructuras y pérdida de integridad en otras, facilitando en algunos casos, un nuevo proceso de remigración. Como resultado de esta interpretación, se pueden explicar fenómenos como el llenado parcial de las trampas en la zona de piedemonte (Ej. Campos Orito, Sucio, Caribe, entre otros), los anticlinales perforados con muestras, pero sin acumulación de hidrocarburos (Ej: Conejo-1, Venado-1, Taruka-1).

Al momento de prospeccionar estructuras en el Piedemonte Andino del Putumayo es imprescindible comprender la dinámica de formación de las fallas y por ende de las trampas, dado que las fallas puramente inversas generadas por el evento tectónico Andino no existían al momento de la primera migración de hidrocarburos y, además, por su generación a partir de fallas de atajo, presentan relieves estructurales menores y pueden entenderse como estructuras *splay* de las fallas mayores y tienen un importante riesgo para la carga de hidrocarburos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a GeoPark por el apoyo y estímulo a la publicación del presente trabajo. Asimismo, al geólogo Camilo Higuera de Ecopetrol, quién fue jurado de tesis del autor principal, con quien compartió numerosas y prolíficas charlas técnicas y sugerencias que contribuyeron a la mejora del trabajo original.

REFERENCIAS

- Aguilera, R. (2006). Modelos de Generación y Migración de Hidrocarburos en la Cuenca del Putumayo. IX Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas". Cartagena.
- Baby, P., Rivadeneira, M., Christophoul, F. y Barragán, R. (1999). Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador. Fourth ISAG, p. 68-72. Goettingen (Germany)
- Barrero D., Pardo A., Vargas C. y Martinez J. (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a new proposal. ANH and B&M Exploration Ltda. 75 p.

- Bogotá, Colombia.
- Caballero, V., Parra, M., Mora, A., López, C., Rojas, L. y Quintero, I. (2013). Factors controlling selective abandonment and reactivation in thick-skin orogens: a case study in the Magdalena Valley, Colombia. In: Nemcok, *et al*, (eds). Thick-skin-dominated orogens: From initial inversion to full accretion. Geological Society, London. Special Publications, 377. p. 343-367.
- Cooper, M., Addison, F., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A., y Taborda, A. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin, V. 79, No. 10. p. 1421-1443.
- Fechi, Y. (2004). Análisis estratigráfico de la Formación Murca del Cretácico Inferior, suroccidente de la plancha 208, municipios de Nocaima y Nimaima, Cundinamarca. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. 134 p.
- Fechi, Y. (2016). Modelo Estructural y Evolutivo del Piedemonte Andino entre Mocoa y Villagarzón, Cuenca del Putumayo, Colombia. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, 137 p.
- Goncalves, F., Mora, C., Córdoba, F., Kairuz E. y Giraldo, B. (2002). Petroleum generation and migration in the Putumayo Basin, Colombia: insights from an organic Geochemistry and basin modeling study in the foothills. Revista Marine and Petroleum Geology 19, p. 711-725.
- Ingeominas (2001). Cartografía geológica de las zonas Andina Sur y Garzón-Quetame (Departamentos de Caquetá, Cauca, Huila, Nariño y Putumayo). Sinopsis acerca de los objetivos, antecedentes, desarrollo, resultados y proyecciones de los trabajos de reconocimiento geológico regional en las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco. 29 p. Bogotá.
- Ingeominas (2003). Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco. Departamentos de Caquetá, Cauca, Huila, Nariño y Putumayo. Memoria Explicativa. 216 p. Bogotá.
- Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. Tectonophysics, volume 404, Issues 3-4: 237-264.
- Martínez, J. (2006). Structural evolution of the Llanos foothills, Eastern Cordillera, Colombia. Journal of South American Sciences 21: 510-520.
- Montenegro, G. y Barragán, M. (2011). Vol. 4: Caguán and Putumayo basins, in Petroleum Geology of Colombia, Edited by Fabio Cediel - ANH. 126 p. Bogotá, Colombia.
- Mora, A. (2007). Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia. PhD Thesis. Universidad de Postdam-Alemania. 133 p.
- Moreno, N., Silva, A., Mora, A., Tesón, E., Quintero, I., Rojas, L., López, C., Blanco, V., Castellanos, J., Sánchez, J., Osorio, L., Namson, J., Stockli, D. y Casallas, W. (2013). Interaction between thin- and thick-skinned tectonics in the foothill areas of an inverted graben. The Middle Magdalena Foothill belt. In: Nemcok, *et al*, (eds). Thick-skin-dominated orogens: From initial inversion to full accretion. Geological Society, London. Special Publications, 377. p. 221-255.
- Nemcok, M., Schamel, S., y Gayer, R. (2005). Thrust-belts. Structural architecture, Thermal regimes and Petroleum systems. 541 p. Cambridge University press.

- Pachón, L. (2013). Subsurface mapping and 3D flexural modeling of the Putumayo *foreland* basin, Colombia. Master of Science Thesis. 153 p University of Houston. USA
- Rowan, M. y Linares, R. (2000). Fold-evolution matrices and axial-surface analysis of Fault-bend folds: Application to the Medina Anticline, Eastern Cordillera, Colombia. AAPG Bulletin, V. 84, No. 6. p. 741-764.
- Urueta, J. y DuToit, CH. (1997). Prospección de hidrocarburos en el piedemonte de la Cuenca del Putumayo. VI Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas". Memoria 1. p. 263-274. Cartagena.
- Van Der Pluijm, B., y Marshak, S. (2004). Earth Structure: An introduction to structural geology and tectonics. Second edition. W. W. Norton & Company. 656 p. New York.