

Seismic geomorphology and fluvial environmental elements in an area of Llanos Orientales (Colombia)

Luis Antonio Castillo-López^a & German Vargas-Cuervo^b

^a *HD Geofísica S.A.S., Bogotá, Colombia. laclacastillo@gmail.com*

^b *Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. gvargasc@unal.edu.co*

Received: July 13th, 2017. Received in revised form: November 23th, 2017 Accepted: December 14th, 2017

Abstract:

Currently disciplines like seismic geomorphology, allows the integration of surface data, constituting a new vision for the interpretation of geological data, especially in areas where it is not possible to obtain surface and subsurface information directly. Thus, indirect methods like tridimensional seismic, surface analogues and sequence stratigraphy have allowed the geomorphology and architectural elements determination, in several kilometers of depth subsurface zones; presenting characteristic geometries, that make possible the delineation and mapping of channel deposits' architectural elements. For example, in the Llanos Orientales Basin throughout its whole extension, a series of architectural elements are present, which are established by facies associations that permit to define them in the subsurface, besides of being interpreted through sequence stratigraphy.

Keywords: Architectural elements; fluvio-lacustrine environment; sequence stratigraphy; seismic geomorphology.

Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia)

Resumen:

Actualmente disciplinas como la Geomorfología sísmica, permite integrar datos de superficie, constituyendo una nueva visión para la interpretación de datos geológicos, especialmente en áreas donde no se hace posible obtener de manera directa información de superficie y del subsuelo. Así, métodos indirectos como la sísmica tridimensional, análogos en superficie y la estratigrafía de secuencias, han permitido determinar la geomorfología y elementos arquitecturales, en zonas del subsuelo a varios kilómetros de profundidad; presentando geometrías características, que posibilitan delinear y mapear elementos arquitecturales de depósitos de canal. Como ejemplo, en la Cuenca de los Llanos Orientales, a lo largo de toda su extensión, se presentan una serie de elementos arquitecturales, los cuales se establecen por medio de las asociaciones de facies que permiten definirlos en el subsuelo, además de ser interpretados, mediante la estratigrafía de secuencias.

Palabras claves: Ambiente fluvio-lacustre; elementos arquitecturales; estratigrafía de secuencias; geomorfología sísmica.

1. Introducción

El desarrollo en la integración de datos geológicos y geofísicos, han permitido tener un mejor conocimiento del subsuelo. Sin embargo, mucha información es restringida, debido a su alto costo y privacidad; regularmente, manejada por la industria petrolera. Además, la información intrínsecamente presenta limitaciones, por ejemplo, resolución, adquisición, procesamiento e interpretación, lo

cual lo hace más complejo. Así, con la imagen adquirida, no siempre es posible hacer seguimiento a las geoformas, ni tampoco su extensión y límites. Una vez se tiene la información del subsuelo, el paso siguiente es el manejo e integración de los datos disponibles, sin embargo, existe poco entendimiento del manejo espacio-temporal. Por ello con este trabajo, a partir de datos de volumen, pozos y cartografía, se puede establecer dicha relación, mediante herramientas como la estratigrafía de secuencias y la geomorfología sísmica. Los

How to cite: Castillo-López, L.A. and Vargas-Cuervo, G., Geomorfología sísmica y elementos en ambientes fluvio lacustres en un sector de los Llanos Orientales (Colombia) Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, pp. 45-52, Enero, 2018.

datos utilizados corresponden a una zona de la parte central de la Cuenca de los Llanos Orientales, los cuales son evaluados y analizados para extraer principalmente los elementos arquitecturales en ambientes fluviales, ubicados a varias centenas de metros del subsuelo. Entre ellos se tienen paleocanales, barras, diques y llanuras. Estos elementos están dispuestos en diferente forma, tanto espacial como temporal. El objetivo principal es el de mapear e interpretar la presencia de paleo-ríos en el subsuelo de un área de los Llanos Orientales. Mediante ello se pueden determinar las posibles unidades geomorfológicas con el fin de evidenciar su dinámica y características, relevantes en aplicaciones académicas o de Industria (Petrolera, Hidrogeología, Ingeniería, etc.). Así se propone establecer la distribución y extensión de geformas encontradas en el subsuelo a más de un kilómetro de profundidad.

1.1. Localización e información

El área de estudio se encuentra en el sector Centro-Este de Colombia, en la Cuenca de los Llanos Orientales (Fig. 1), con información que comprende dos pozos con registros eléctricos (Rayo Gama y Densidad), un volumen sísmico de 40 km², con un procesamiento preapilado en tiempo (3D *Pre-Stack Time Migration*-PSTM), una longitud de registro de 3s, tasa de muestreo de 2ms (Fig. 2).

Además del volumen sísmico e información de varios pozos, se dispone de datos de superficie: Cartografía, geomorfología, *raster*, MDT, imágenes de satélite y *Landsat*.

En la Cuenca de los Llanos Orientales, han sido llevados a cabo estudios estratigráficos [1-4], y estructurales [5-9]. En ellos se define la estratigrafía y tectónica de la cuenca, a partir de datos sísmicos y de pozos. En otros abordajes, se tienen aproximaciones aloestratigráficas [10], o trabajos con descripciones e interpretaciones, por ejemplo, litoestratigrafía y estratigrafía de secuencias [11] a abordajes secuenciales [12-15].

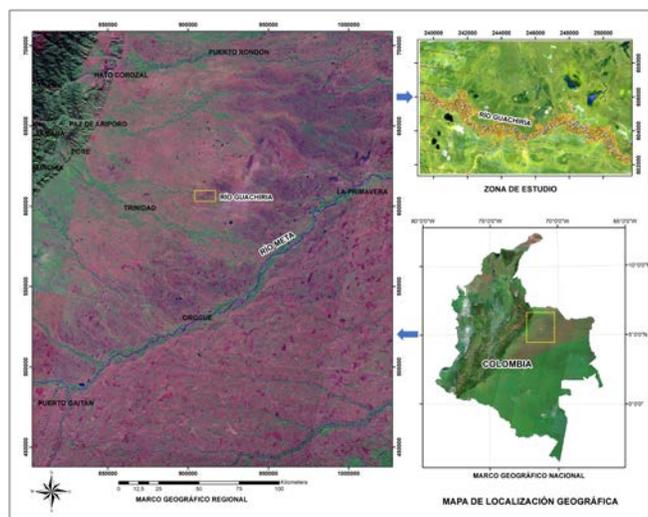


Figura 1. La zona de estudio se localiza en el extremo oeste de la Cuenca de los Llanos Orientales (Cuadro).
Fuente: Los autores

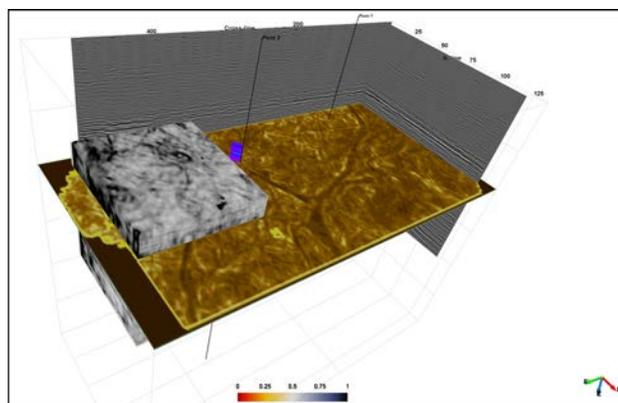


Figura 2. Información geofísica incluye el volumen sísmico e información de pozos (Escala X, Y y Z (Profundidad) en metros)
Fuente: Autores.

1.2. Estado del arte

En este estudio se hace uso de herramientas como la Geomorfología sísmica, que incluye estratigrafía de secuencias, y considera análogos, para hacer la interpretación de un sector de la cuenca, estableciendo la disposición espacio-temporal de los elementos de depósitos fluviales en profundidad. Regularmente, la geomorfología se asocia a datos de superficie o de la geología expuesta, sin embargo, la sísmica 3D permite determinar rasgos y elementos arquitecturales a diferentes profundidades, y no exclusivamente con elementos que están expuestos [16]. Para ello se hace uso del entendimiento estratigráfico, para establecer un modelo secuencial [17] que permita evidenciar las características para los diferentes sistemas deposicionales, asociados con análogos identificados en superficie. El modelo secuencial es deposicional tipo III [18].

2. Metodología

En áreas con litología homogénea y disposición de sedimentos en capas horizontales, casi planas, por ejemplo, los Llanos Orientales, la cartografía geológica en superficie no permite el conocimiento del subsuelo, esto ya que los paquetes de roca se disponen casi horizontalmente o con buzamientos muy pequeños (disposición plano paralela de los sedimentos), lo que obliga a emplear métodos indirectos (geofísica) para el conocimiento de las capas en el subsuelo. El análisis de los datos sísmicos hace necesario relacionar la geofísica, la geología y geomorfología a los procesos morfogenéticos superficiales, para ello se hace uso de herramientas como la geomorfología sísmica y la estratigrafía secuencial [17-19]. Así, es importante diferenciar el proceso de descripción y de la interpretación de datos sísmicos, lo cual se incluye en la metodología (Fig. 3). Previo amarrar datos sísmica-pozo-geología, se determina las facies (Eléctricas, sísmicas o litológicas), y su asociación, buscando establecer los elementos característicos para encontrar los posibles ambientes. Con este análisis preliminar es posible determinar las superficies claves, límites, sistemas deposicionales, para finalmente obtener las secuencias.

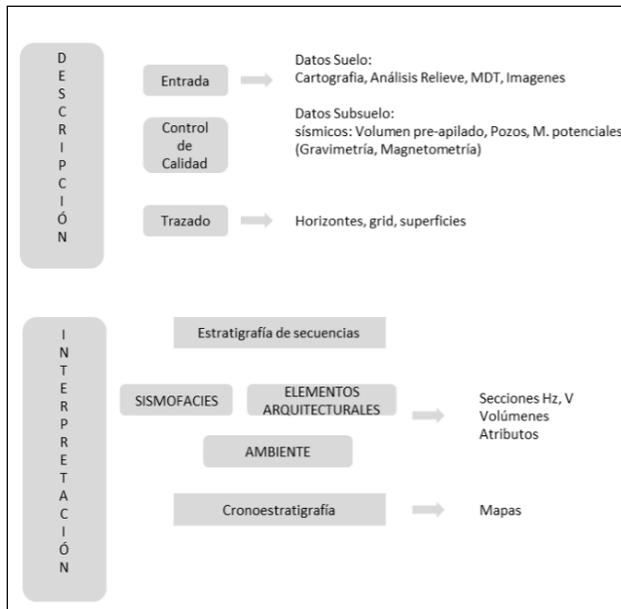


Figura 3. Metodología y seguimiento para el estudio geomorfológico. Fuente: Autores.

Los datos de superficie se analizan mediante el procesamiento e interpretación de imágenes de satélite multitemporales particularmente Landsat TM, ETM y LDCM, con diferentes registros del comportamiento de las aguas (Bajas, medias y altas). El conjunto de datos es pre-procesado, mediante Filtros, atributos, o extracción de geocuerpos. Haciendo la descripción de secciones, más conocida como trazado de horizontes, es integrada, para finalmente obtener el modelo secuencial. Esta información integrada a la información de superficie, los análogos (Fig. 4), y sus elementos arquitecturales, son quienes permiten establecer una relación con los eventos del pasado, y que son analizados, descritos e interpretados en el subsuelo. El modelo final permite establecer una relación espacio-temporal de los elementos que constituyen los diferentes depósitos. En este estudio se busca identificar y describir los diferentes ambientes y secuencias a que pertenecen.

2.1. Marco teórico y análisis preliminar

La información de superficie sirve como análogo geomorfológico para el análisis de los sedimentos dispuestos

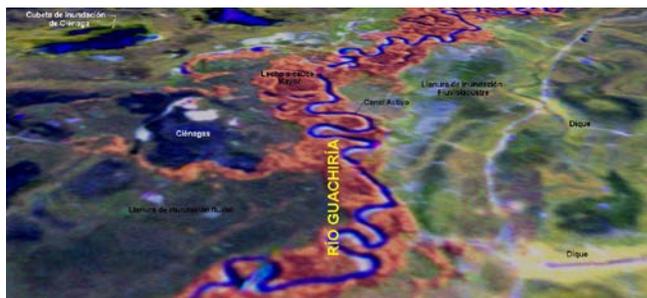


Figura 4. Análogo en superficie de la disposición de los diferentes elementos de un canal o grupo de los mismos Fuente propia. Base imagen Landsat procesada 3D.

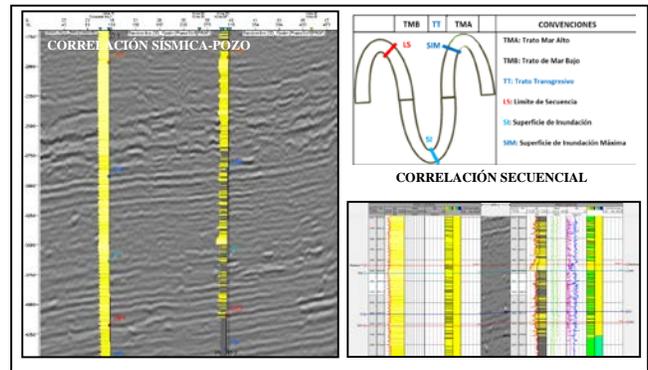


Figura 5. Correlación e interpretación secuencial de los pozos 1 y 2 Fuente: Autores.

en el subsuelo. Dicha información ayuda a determinar elementos geomorfológicos en ambientes fluviales: Barras, superficies de desborde, talveg, meandros y diques, además de ambientes aledaños, como llanuras de inundación (Fig. 3). En el análogo, el lecho principal activo corresponde al río Guachiría, dispuesto en dirección casi oeste-este, con una marcada migración que se extiende casi 1 Km, respecto al cauce principal. Además, es evidente la presencia de barras, caracterizada por litología tipo arenosa. Los afluentes y drenajes menores están constituidos por cauces que convergen casi diagonales al lecho principal (dirección NNW-SSE).

Cuando se hace referencia a estudios secuenciales, esta no se limita únicamente a información sísmica; la correlación de pozos, mediante datos de afloramiento, columnas o registros eléctricos, constituyen otra herramienta, poco utilizada secuencialmente. En el área de estudio se tiene información de dos pozos, cuya correlación secuencial, se basa en el análisis de secuencias [20], lo que ayudó a interpretar la presencia de diferentes elementos arquitecturales, por ejemplo, paleocanales, planicies de inundación, y superficies erosivas, (Fig. 5) con diferente disposición, variando las geoformas, que van de paleocanales aislados, hasta complejo de paleocanales amalgamados. Estos elementos se determinan geoméricamente, y correlacionados con la interpretación secuencial de pozos, donde la asociación facial corrobora la identificación de los diferentes depósitos. Los paleocanales están ligados a superficies erosivas o cambios abruptos en las facies, mientras los de inundación a valores altos de los registros gama, y poca variación en los registros, con dominio de material fino.

El análisis se basa en la identificación de facies, donde se integraron las electrofacies y las litofacies (Arena y arcillas), además se consideran los parámetros necesarios para un análisis secuencial. Estos son, la eustasia, el aporte de sedimentos y espacio de acomodación. La razón entre el Espacio de Acomodación (E) y el Aporte de Sedimentos (S) permite establecer la disposición geométrica, extensión y apilado de los sedimentos (Fig. 5). Considerando las facies y teniendo en cuenta las variaciones en la vertical, estos no se cumplen con la horizontal, contradiciendo la Ley de Walter

[21]. Esta limitación es frecuente en ambientes de tipo continental, por ejemplo, los depósitos aluviales o de tipo limnológico.

3. Análisis geológico y geomorfológico

3.1. Geomorfología de Superficie

La cartografía de superficie y la sísmica del subsuelo permitieron establecer para la zona, un ambiente fluvial y lacustre de piedemonte, donde los cauces fluviales siguen un patrón paralelo hasta la desembocadura del río Meta, que forma la barrera morfoestructural de la altillanura de la Orinoquía. Geológica y geomorfológicamente estos materiales se constituyen de depósitos inconsolidados de origen aluvial, lacustre y mezcla de estos desarrollan diferentes geoformas (Fig. 6), así: El cauce activo del lecho fluvial (Río Guachiría) presenta un patrón morfológico general paralelo y localmente meándrico o sinuoso. Este tributario activo se desplaza lateral y frontalmente sobre un lecho mayor [22] que se compone de arenas y limos de composición cuarzosa y lítica, proveniente de los materiales denudados de la cordillera oriental. A su vez, presenta un ancho entre 53 metros y 1,9 km, sobre el cual se caracterizan meandros abandonados o madre viejas como registro de su dinámica. Asociado al lecho mayor se desarrollan llanuras de inundación fluvial, que corresponden a zonas de amortiguamiento en periodos de aguas altas y son frecuentemente inundadas. Estas llanuras se componen de materiales más finos como limos y arcillas con altos contenidos de materia orgánica.

Posteriormente en una dimensión lateral a estas llanuras se presenta una morfología de cubetas formadas por Ciénagas y llanuras fluvio-lacustres compuestas principalmente por arcillas con alto contenido de materia orgánica.

Además de las formas en superficie, se tiene la evidencia de elementos arquitecturales para los paleo canales, que se disponen en dirección NE-SW. Esta disposición hace referencia al sistema

principal, con presencia de tributarios con dirección casi-NS. Estos paleo canales se presentan aislados hacia la base (Sistema de Nivel Bajo, SNB), pasando a un incremento en el espacio de acomodación, dando como resultado zonas de inundación, seguidos de disposición de sedimentos de forma progradante, incrementados en el apilado de complejos de canales (Sistema de Nivel Alto, SNA).

3.2. Geomorfología Sísmica

Para los datos sísmicos 3D, basados en análisis de secciones horizontales es más fácil determinar, sus elementos arquitecturales: Lecho principal, Valle, Dique, cauce meandro y paleocauce. Aunque estos son los ambientes típicos de la Cuenca de los Llanos Orientales, debido a problemas de resolución, imagen, etc., se hace difícil establecer algunos elementos a profundidades mayores, por lo cual análogos, permiten encontrar geoformas o elementos geomorfológicos similares (Figs. 7, 8).

Para el estudio del subsuelo, la información sísmica original, mediante Atributos y estratigrafía secuencial, hace posible identificar y mapear las posibles geoformas. Se emplearon atributos aislados (Coherencia, Descomposición espectral, Impedancia, Energía, RMS, Similitud, Curvatura, entre otros) combinados con análisis en tiempos constante, intervalos entre horizontes, para determinar la disposición de los diferentes elementos arquitecturales.

Inicialmente se cuenta con las secciones extraídas del cubo sísmico, que permiten el análisis descriptivo del área. Sin embargo, al volumen original se le aplicaron diferentes atributos (ya mencionados) o combinación de ellos, y se extrajeron las secciones (Verticales y horizontales, Figs. 5-7). El atributo de Impedancia Acústica Relativa, permite hacer seguimiento a los diferentes paleo-ríos; estos se presentan a profundidades de 100m a 900m, siendo predominantemente geoformas sinusoidales con direcciones predominantes NE-SW.

A pesar de la evidencia de la existencia de diferentes paleocanales en el cubo sísmico, estos no pueden ser discriminados, con un solo atributo. Para ello se hizo otro análisis, basado en multiatributos, donde se consideran: el

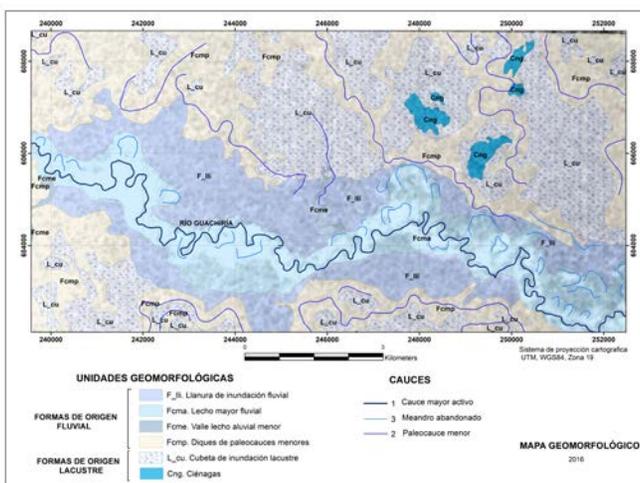


Figura 6. Unidades geomorfológicas en superficie: Corresponde a los análogos a establecer para el estudio geomorfológico en profundidad Fuente: Autores.

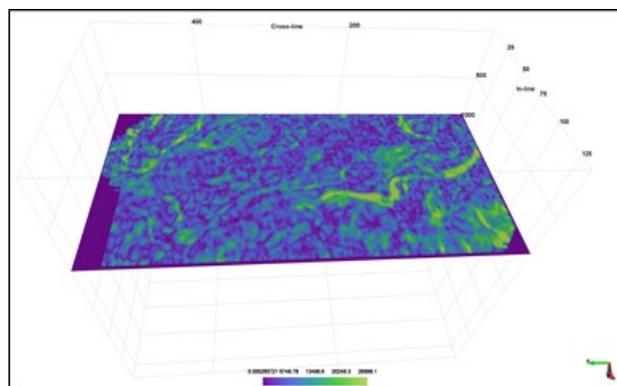


Figura 7. Sección Sísmica horizontal correspondiente a un atributo de coherencia aplicado al volumen Fuente: Autores.

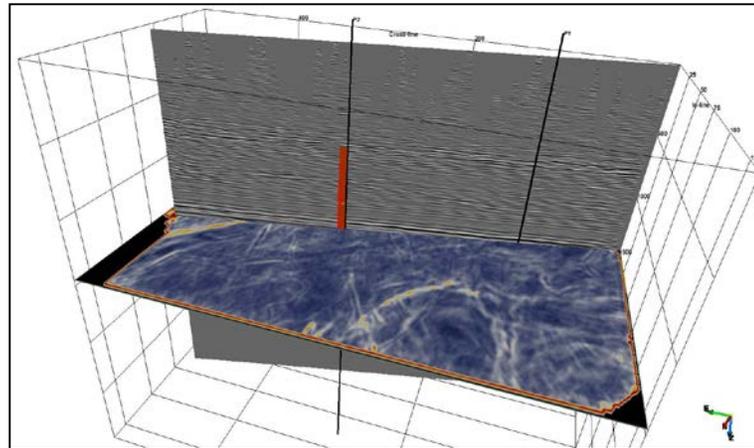


Figura 8. Sección Horizontal y la interpretación de paleocanales y su edad relativa, resultado de la combinación de 3 atributos sísmicos
Fuente: Autores.

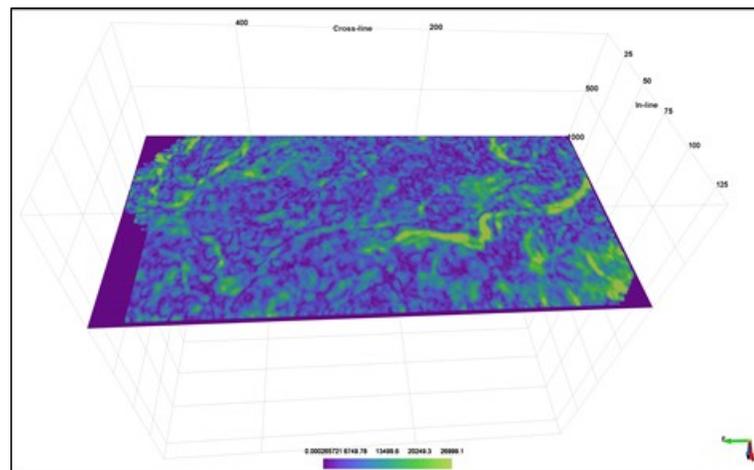


Figura 9. Extracción y análisis de atributos sísmicos, p.e., Descomposición espectral (frecuencias de 45-80Hz y saltos cada 10)
Fuente: Autores.

RMS, cambio de fase, descomposición espectral y coherencia (Fig. 9). Mediante este Multiatributo se hace posible establecer la temporalidad relativa, siendo el más antiguo el paleo-canal 1, hasta el 7 como el más reciente. Además de la evidencia geométrica, mediante la descomposición espectral se hace posible encontrar la temporalidad relativa de los eventos, caso de diferentes paleo canales.

4. Integración de la información y resultados

El uso de herramientas como la estratigrafía de secuencias permite integrar diferentes datos, por ejemplos sísmicos, pozos, cartografía de superficie, geoquímica, además de interpretación basada en análogos de superficie, con lo cual pueden determinarse características semejantes a los depósitos encontrados en el subsuelo. En sentido geomorfológico, la dinámica y disposición de los ríos actuales. Entre los elementos arquitecturales se presentan: el *talweg*, la barra, la superficie de desborde, entre otras. Los canales superiores se presentan entrelazados, correspondientes a paleocanales de tipo fluvial.

Hacia la parte intermedia cambia a régimen lineal de 8 km aproximadamente, a otros semi-rectos con longitudes mapeadas de 10 km, casi rectos con pocos meandros y cursos angostos. En su mayoría representan canales efímeros, en zonas de planicies inundadas.

Una vez se tienen el trazado de superficies, la determinación de sismofacies y su asociación, se hace posible establecer un modelo secuencial, el cual muestra en su verdadera posición espacio-temporal los diferentes eventos marcados. Así, inicialmente se tienen los elementos asociados a los procesos erosivos, dando lugar a depósitos de canales, pertenecientes al Sistema de Mar Bajo (Fig. 10a); a esto se siguen procesos de inundación, donde el predominio es netamente del material arcilloso, resultado del aumento del nivel eustático relativo [18], donde el nivel base, en este caso el lago, tiende al mar, correspondiente a un sistema transgresivo (Fig. 10b), donde se tiene un incremento en la relación entre el espacio de acomodación y el aporte de sedimentos ($E/S > 1$). A partir de este evento se suceden ciclos de inundación y también caídas eústáticas. Estos ambientes están ligados a ciclos de subida y

descenso del nivel base, considerando una subsidencia suave y constante, al igual que la sedimentación. Finalmente, se tiene la deposición de las progradaciones asociadas al sistema de Mar

Alto, con mucho aporte de sedimentos y reducción en el espacio de acomodación ($E/S < 1$), dando lugar a la progradación de sedimentos (Fig. 10c).

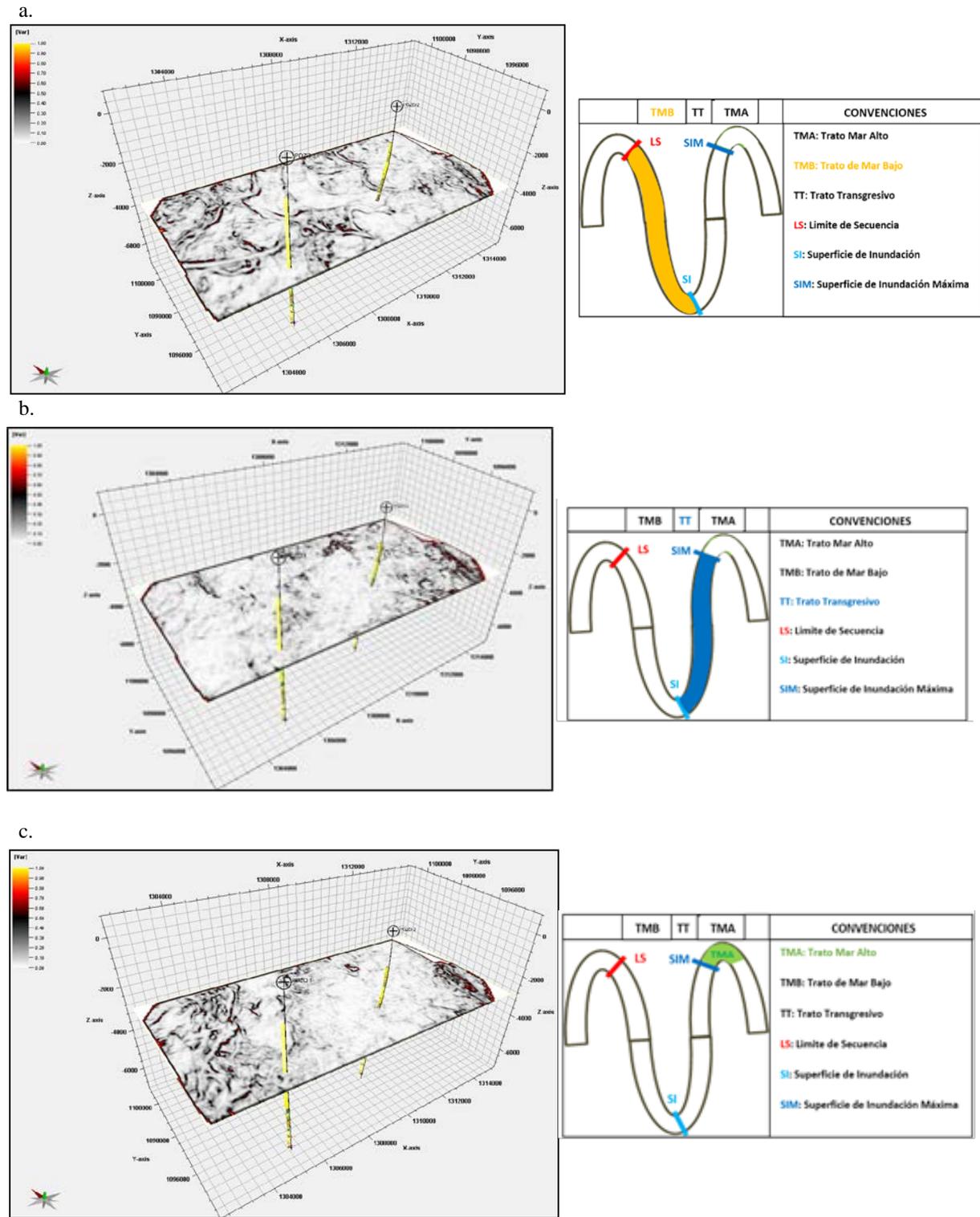


Figura 10. Análisis secuencial e integración a la curva eustática relativa de los sistemas de depósito Bajo (a), Transgresivo (b) y Alto (c). Fuente: Autores.

La última etapa permite extraer la disposición tridimensionalmente (voxel), de las diferentes geoformas analizadas, permitiendo obtener la disposición espacio-temporal de los diferentes elementos arquitecturales de depósitos fluviales desde la superficie hasta los eventos más profundos, en este caso analizados para la Cuenca de los Llanos Orientales, hasta el Paleógeno [14 y 19].

5. Conclusiones

Interpretaciones geológicas y geofísicas, no deben ser confundidas con descripciones. Por ello, se tienen que incluir componentes espacio-temporales, ejemplo de ello es la estratigrafía de secuencias. En este artículo el análisis es netamente secuencial, y no de tipo litoestratigráfico.

La extracción de datos del subsuelo hace necesario el uso de métodos o herramientas indirectas, caso de la información sísmica. Además, se requiere de la integración con otras herramientas para establecer un control espacio-temporal de las diferentes geoformas. Así, en la Cuenca de los Llanos Orientales, las diferentes superficies, como discordancias, inundación, máxima inundación, son claves para la definición secuencial.

Incisiones fluviales acontecieron durante el sistema de nivel bajo, donde los diferentes paleocanales en su mayoría tienen lugar durante la caída eustática, y un bajo cociente de sedimentación/espacio de acomodación (S/E), sin embargo, las características geomorfológicas cambian. Esta variación está relacionada con la disposición de los sedimentos y el basculamiento de la cuenca.

Los análogos permiten visualizar la disposición actual del sistema fluvial, aunque este ha variado con el tiempo. La disposición de los paleocanales en el subsuelo, presentan una dirección preferencial NW-SE, con tributarios casi oblicuos.

Análisis multiatributos, integrados a la secuencial permiten caracterizar la disposición estratigráfica, especialmente en sistemas de mar bajo, los cuales son dominados por paleocanales, cambiantes a sistemas transgresivos, dominados por zonas inundadas. Estos terminan con el apilado de sedimentos progradantes, correspondientes a sistemas de mar alto.

Los límites secuenciales tienen un sentido temporal, así las secuencias inferiores presentan depósitos más antiguos, que los encontrados por encima de la secuencia.

Bibliografía

- [1] Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Reyes-Harker, A. and Torres, V., Paleocene-Middle Miocene flexural-margin migration of the non-marine Llanos foreland basin of Colombia. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(3), pp. 141-160, 2007.
- [2] Fajardo, A., Rojas, E., Cristancho, J. y Consorcio G. y G., Going System, L., Definición del modelo estratigráfico en el intervalo Cretáceo tardío a Mioceno medio en la Cuenca Llanos Orientales y Piedemonte Llanero. *Ecopetrol S.A. Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), Piedecuesta*, 2000, pp. 1-126.
- [3] Santos, C., Jaramillo, C., Torres, V., Rueda, M., Flórez, P. y Rodríguez, G., Influencia marina en el Eoceno tardío del Oriente y Suroriente de Colombia. *Boletín de Geología*, 29(2), pp. 57-65, 2007.
- [4] Sarmiento, L.F., *Petroleum geology of Colombia, Llanos Basin. Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT-ANH*, 2011.
- [5] Bayona, G., Cortes, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J. and Reyes-Harker, A., Integrated analyses of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous evolution of the linked Eastern Cordillera Orogen and the Llanos foreland Basin of Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 120, pp. 1171-1197, 2008. DOI: 10.1130/B26187.1
- [6] Cooper, M.A., Addison, F.T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R.H., Hayward, A.B., Howe, S., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J. and Taborda, A., Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and middle Magdalena Valley, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists*, 79(10), pp. 1421-1443, 1995.
- [7] Cortés, M., Bayona, G., Aristizabal, J., Ojeda, G., Reyes Harker, A. and Gamba, N., Structure and kinematics of the eastern foothills of the eastern cordillera of Colombia from balanced cross-sections and forward modelling. En: *Simposio Bolivariano Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas, Cartagena, Colombia*, 2006, 14 P.
- [8] Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimate, C., and Rodríguez, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25, 2006, pp 1-19. DOI: 10.1029/2005TC001854
- [9] Sarmiento, L.F., Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, Inferences from tectonic models. Doctorate Theses, Netherlands research, School of Sedimentary Geology, Netherland, 2001.
- [10] Aguilar-Rangel, S., Estratigrafía secuencial de las unidades aflorantes en las quebradas La Piñalera (Sabanalarga) y La Pescana (Monterrey) Casanare, Colombia. *Geología Colombiana. Edición X Semana Técnica de Geología e Ingeniería Geológica Bogotá, Colombia*, 37(1), pp. 9-10, 2012.
- [11] Duarte, E., Bayona, G., Jaramillo, C., Parra, M., Romero, I., y Mora, J.A., Identificación de los máximos eventos de inundación marina Miocenos y su uso en la correlación y análisis de la cuenca de antepaís de los Llanos Orientales, Colombia. *Boletín de Geología*, 39(1), pp. 19-40, 2017. DOI: 10.18273/revbol.v39n1-2017001
- [12] Arango, J., Análisis sismoestratigráfico de la formación carbonera Miembro C7 (Municipios de Orocué y San Luis de Palenque, Cuenca Llanos Orientales), Colombia. Tesis de Maestría en Ciencias Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2014.
- [13] Torrado, L., Mann, P. and Bhattacharya, J., Application of seismic attributes and spectral decomposition for reservoir characterization of a complex fluvial system: Case study of the Carbonera Formation, Llanos foreland basin, Colombia, 2014.
- [14] Villamizar, F., Análisis Sismoestratigráfico y secuencial del sector sur oeste de la Cuenca de los Llanos orientales (Colombia). Tesis de Maestría en Ciencias Geología, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, 2015.
- [15] Villamizar, F. y Castillo L.A., Análisis sismoestratigráfico y secuencial del sector sur oeste de la Cuenca de los Llanos orientales (Colombia). *Boletín de Geología, UIS*, 38(3), pp. 55-69, 2016. DOI: 10.18273/revbol.v38n3-2016004
- [16] Brown, A., Interpretation of three-dimensional seismic data. *AAPG Memoir* 42, pp. 72-83, 1986.
- [17] Posamentier, H. and W., Seismic geomorphology: Imaging elements of depositional system form shelf to deep basin using 3D seismic data: Implications for exploration and development. In: Davis, R.J. Cartwright, J., Stewart, S.A., Lappin, M. and Underhill, J.R. Eds. 3., 3D seismic terminology: Application to the exploration of the sedimentary basins, Geological Society of London, Memoir. 2004, 274 P.
- [18] Catunenanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Erikson, P.G., Fielding, C.R., Fisher, W.I., Galloway, W.E., Gibling, M.R., Giles, K.A., Holbrook, J.M., Jordan, R., Kendall, C.G. St.C., Macurda, B., Martinsen, O.J., Miall, A.D., Neal, J.E., Nummedal, D., Pomar, I., Posamentier, H.W., Pratt, B.R., Sarg, J.F., Shanley, K.W., Steel R.J., Tucker M.E. and Winker, C.,

Towards the standardization of sequence stratigraphy, earth science Reviews, Elsevier's Sciences & Technology. British Library, [online]. 2008. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/50a9/8f2548cfae4e6ef7cd32f3b622eb4d82c443.pdf>

- [19] Castillo L.L.A., Interpretação sismoestratigráfica e geomorfologia sísmica do Cone de Rio Grande, Bacia de Pelotas. Teses de Doutorado, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Departamento de Geociencias. Porto Alegre (Rio Grande do Sul). Porto Alegre, Brazil, 2009.
- [20] Karogodin, Y.N., Relações mutuas entre os complexos cíclicos sedimentares em seções de bacias contendo Petróleo e gás. Dohl. Akad. Nauk. SSSR. 220(6), pp. 1414-1416, 1975.
- [21] Middleton, G., Johannes Walther's law of the correlation of facies GSA Bulletin, [online]. 84(3), pp. 979-988, 1973. Available at: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84<979:JWLOTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<979:JWLOTC>2.0.CO;2)
- [22] Vargas, G., Guía y catálogo de unidades geomorfológicas en Colombia por sensores remotos. Universidad Nacional de Colombia. Primera edición. 2015, 195 P.

L.A. Castillo-López, es Geólogo (1994) de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, MSc. en Geofísica (2000) de la UFPA (Brasil), y PhD en Estratigrafía (2009) de la UFRGS (Porto Alegre, Brasil). Actualmente es consultor, en el sector de hidrocarburos. Su interés incluye interpretación sísmica, estratigrafía de secuencias, procesamiento, interpretación y modelamiento sísmico, Geofísica de superficie. En la academia ha sido director de por lo menos 30 tesis de pregrado, 15 de maestría, y encaminado algunas de doctorado.
ORCID: 0000-0003-4444-2129

G. Vargas-Cuervo, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, DESS en Teledetección y Dr. en Ciencias de la Tierra de la Universidad Pierre et Marie Curie, Paris VI. Profesor de la Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografía, sede Bogotá, Colombia. Coordinador grupo de investigación en Geotecnologías y autor de libros y artículos de geomorfología de zonas tropicales.
ORCID: 0000-0003-2489-3993



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de
Materiales

Mayor información:

E-mail: acgeomin_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 53 68