

Análisis de la información palinoestratigráfica del Banco de Información Petrolera - BIP y de otras fuentes: Una estrategia para revisar el pasado y planear el futuro exploratorio del país.

Carlos Cuartas^{1,2}, Carlos Jaramillo¹, Ariel Arjona¹, Andrés Pardo^{2,3}, Silane Da Silva¹, Felipe de la Parra¹, Millerlandy Romero¹, Paula Mejía¹, Manuel Paez¹.

¹Smithsonian Tropical Research Institute-STRI, Panamá

²Agencia Nacional de Hidrocarburos-ANH

³Universidad de Caldas, Manizales

© Copyright 2009 ACGGP.

This paper was prepared for presentation at the X Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas held in Cartagena, Colombia, July 2009. This paper was selected for presentation by the X symposium Technical Committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s).

Resumen

La Agencia Nacional de Hidrocarburos contrató con el Smithsonian Tropical Research Institute-STRI la realización de dos proyectos: 1) El inventario y evaluación de la información palinológica de las cuencas sedimentarias de Colombia y 2) La zonificación palinológica para el Maastrichtiano, Cordillera Oriental de Colombia. Estos proyectos son de gran importancia, ya que el primero permite conocer el estado actual del conocimiento de la palinología como herramienta en la exploración de hidrocarburos y el segundo utiliza una metodología sugerida para realizar los estudios palinológicos futuros.

Para la realización del primer proyecto, se revisó, evaluó y seleccionó la información disponible en el EPIS y en otras fuentes publicadas; posteriormente se hizo una revisión taxonómica y selección de especies con importancia bioestratigráfica. Toda esta información se introdujo en una base de datos y se construyó la sucesión ideal de eventos bioestratigráficos mediante el método de Optimización por Restricciones.

Para el segundo proyecto se muestrearon siete secciones de superficie/corazón en la región NE de Colombia y se analizaron 320 muestras palinológicas. Esta información, unida a la ya publicada, se empleó para realizar un análisis bioestratigráfico cuantitativo usando las técnicas de Correlación Gráfica y Optimización por Restricciones.

El inventario y análisis de la información permite concluir que la información palinológica obtenida hasta el momento no permite definir zonaciones que alcancen los niveles de resolución y calidad que la industria petrolera actual requiere para disminuir el riesgo exploratorio.

Mediante el segundo proyecto se logró dividir la secuencia Maastrichtiano-Campaniano más superior en tres zonas palinológicas con 92 eventos bioestratigráficos.

Palabras clave: Palinología, EPIS, cuencas sedimentarias de Colombia, CONOP, Correlación Gráfica, zonación cretácica

Introducción

En este artículo se presentan los resultados de dos casos de estudio en apariencia independientes: “Inventario y Evaluación de la Información Micropaleontológica en las Cuencas Sedimentarias de Colombia (Caso Palinología)” (Cuartas *et al.*, 2008) y “Zonación Palinológica para el Maastrichtiano, Cordillera Oriental de Colombia” (Jaramillo, *et al.*, 2009).

El primero se desarrolló con la información palinológica existente en el Banco de Información Petrolera de Colombia - EPIS de la ANH y con aquella publicada en artículos científicos. El inventario y análisis de esta información permitió sugerir recomendaciones para futuros trabajos bioestratigráficos de acuerdo con las necesidades exploratorias de la industria petrolera del país. De esta manera se llevó a cabo una “revisión del pasado bioestratigráfico” y, a su vez, se plantearon lineamientos para el futuro de la exploración de hidrocarburos en el país

El segundo, además de enfocarse en la zonificación para el Cretácico (Maastrichtiano-Campaniano) en la Cordillera Oriental de Colombia, tuvo como objetivo implementar aquellas sugerencias planteadas en el primer proyecto y servir

como referencia metodológica a futuros trabajos bioestratigráficos aplicados en la exploración de hidrocarburos.

Un sinnúmero de empresas extranjeras y nacionales han explorado hidrocarburos en el país. Durante este proceso se ha generado gran cantidad de información geológica y geofísica. La palinología ha sido parte esencial en esta exploración, ya que es uno de los grupos fósiles más abundantes en las rocas que poseen hidrocarburos en Colombia. Por esta razón, el conocimiento de la cantidad y calidad de la información palinológica generada por la industria permitirá planificar nuevas investigaciones (Cuartas *et al.*, 2008).

Para lograr este objetivo se realizó una búsqueda intensiva en el EPIS de toda la información palinológica archivada. Así mismo, se revisaron todas las publicaciones que tuvieran información paleopalínológica. La evaluación de la calidad y cantidad de todo este material fue realizada para cada cuenca sedimentaria (ANH, 2007). Un filtro de calidad inicial permitió determinar que información podría resultar útil para un análisis bioestratigráfico (Cuartas *et al.*, 2008).

Aquella información palinológica que por sus características fue catalogada como útil, fue analizada cuantitativamente. Para ello se utilizó el Método de Optimización con Restricciones-CONOP (Kemple *et al.*, 1995). Esto con el fin de encontrar, para cada cuenca que lo permitiera, la secuencia palinológica óptima. Es decir, aquella secuencia de eventos de primeras y últimas apariciones de morfoespecies que representa, teóricamente, la menor contradicción en su orden con respecto al orden encontrado en cada uno de los pozos/secciones usados para el análisis. Esta secuencia es la base para cualquier zonación bioestratigráfica.

De manera particular, contar con la zonación del Cretácico más superior de la Cordillera Oriental, resulta estratégico para la industria petrolera, ya que al parecer muchas de las estructuras geológicas relacionadas con la generación, migración y entrapamiento de los hidrocarburos comenzaron a formarse durante este periodo, lo que se manifiesta en cambios de espesores, discordancias y condensación en algunos sitios del Piedemonte Llanero.

Para construir esta zonación se analizó el contenido palinológico de varias secciones, tanto de superficie como de corazón, en la secuencia del Cretácico Superior en la Cordillera Oriental y áreas aledañas. Esta información se sumó a la ya publicada, para ser tratada cuantitativamente usando dos técnicas bioestratigráficas; CONOP ya mencionada anteriormente y la Correlación Gráfica. Este análisis

cuantitativo produjo una zonación para el Maastrichtiano-Campaniano más superior con tres zonas y 92 eventos bioestratigráficos, en la cual cada evento posee un intervalo de confianza.

Es importante resaltar el hecho de que la palinología ha sido usada por la industria petrolera para fines eminentemente prácticos como dataciones de roca, correlaciones estratigráficas, solución a problemas estructurales y a la determinación de ambientes sedimentarios. Sin embargo, la generación de nuevo conocimiento bioestratigráfico debe ser asumida por universidades, centros de investigación y entidades encargadas del desarrollo geológico del país con el apoyo y acompañamiento de la industria.

Metodología

Se describirá inicialmente aquella metodología seguida para lograr los objetivos propuestos en el proyecto de evaluación de la información del EPIS. Posteriormente se describirá la seguida en el proyecto de la zonación del Cretácico Superior.

Consulta y Evaluación de la Información Palinológica. Se revisaron los reportes palinológicos encontrados en EPIS, así como todas las publicaciones que contienen información palinológica de Colombia, con excepción del Cuaternario. Para cada localidad se evaluaron los siguientes parámetros: localización geográfica y estratigráfica de la muestra, número de intervalos de muestreo, densidad del intervalo de muestreo, número de especies y grado de formalidad en el nombre de las mismas (Cuartas *et al.*, 2008).

Sistematización de la información. Se digitó y se filtró taxonómicamente la información de acuerdo con la nomenclatura de Jaramillo y Rueda (2008). Sólo se incluyeron las secciones/pozos con una clara localización geográfica y estratigráfica, un número de muestras superior a 10, intervalo de muestreo inferior a 300 pies, número de especies superior a 30 y con al menos un 50% de ellas nombradas formalmente (Cuartas *et al.*, 2008). Para almacenar y administrar la información se utilizó el programa MySQL versión 5.1 (MySQL, 2008). Este es un administrador de bases de datos relacionales, de acceso libre, multiplataforma y ampliamente probado en el manejo de este tipo de información.

Análisis cuantitativo y zonificación palinoestratigráfica por cuencas. Para el análisis cuantitativo no se utilizó toda la información almacenada durante la fase anterior, ya que la experiencia bioestratigráfica en el país ha demostrado que un intervalo de muestreo adecuado para la exploración de hidrocarburos es de aproximadamente 30 pies (Jaramillo *et al.*,

2005). Sin embargo, pocos de los trabajos revisados cumplen con esta densidad. Por tal razón se seleccionaron sólo los pozos/secciones que tuvieran un intervalo de muestreo de menos de 100 pies (Cuartas *et al.*, 2008).

Como el registro bioestratigráfico es altamente incompleto es común encontrar contradicciones en la sucesión de especies observadas entre dos o más pozos (e.g. El orden de FO y de LO encontrado para un taxon determinado con respecto a los eventos de FOs y LOs de otros taxones, puede cambiar de lugar a lugar). Este tipo de contradicciones se deben a factores que incluyen el diseño del muestreo, procesos ecológicos de migración, tasas diferenciales de evolución de un taxón y preservación incompleta (Cooper *et al.*, 2001; Gradstein *et al.*, 1985). Por lo tanto esta información se analizó cuantitativamente mediante el método de optimización con restricciones usando el programa CONOP9 (Sadler, 2006), el cual permite hallar la secuencia óptima de eventos bioestratigráficos dentro de un conjunto de modelos posibles (Kemple *et al.*, 1995). Esto lo logra comparando, de manera conjunta, todos los eventos observados en los pozos (Por ejemplo la primera (FO) o última (LO) observación de una especie) con modelos de secuenciación generados de manera aleatoria. De éstos, toma el modelo óptimo, es decir, el modelo que más se ajusta a los datos observados en los pozos/secciones, y por lo tanto, en el que la extensión total de eventos de FOs y de LOs fuere mínima (Figura 1).

Esta técnica ha sido aplicada en la Formación Riley, Texas (Kemple *et al.*, 1995), en la Cuenca de Taranaki, Nueva Zelanda (Cooper *et al.*, 2001) y en el norte de Colombia (Cuartas *et al.*, 2006; Rincón *et al.*, 2007).

Caso piloto de zonación palinológica para el Maastrichtiano, Cordillera Oriental de Colombia. La investigación se desarrolló en tres fases. La primera analizó el contenido palinológico de 327 muestras provenientes de 6 secciones de superficie y un corazón a las cuales se adicionaron para el estudio tres secciones de superficie publicadas en la literatura (Sarmiento, 1992; Yepes, 2001; Jaramillo *et al.*, 2006). De igual manera que para el primer proyecto, la taxonomía de las especies siguió la base de datos morfológica de Jaramillo y Rueda (2008).

La segunda fase consistió en el análisis cuantitativo de la información, para lo cual se usaron los métodos de optimización con restricciones - CONOP y el de Correlación Gráfica.

El método de Correlación Gráfica (Shaw, 1964; Edwards, 1984; Edwards, 1989) permite construir una secuencia de

eventos compuestos, es decir, una secuencia conformada por el aporte de información de un conjunto de pozos/secciones. La técnica se desarrolla en el plano cartesiano y no asume a priori ningún taxon en particular como fósil guía, ya que usa la asociación completa para trazar líneas de correlación (Figura 2). Como este método busca los máximos rangos bioestratigráficos para cada especie que se estudia, para iniciar el proceso se requiere escoger una sección de referencia con buen recobro de microfósiles y, en lo posible, sin hiatos ni complicaciones estructurales. Siguiendo el método propuesto por Edwards (1984), se realizaron tres rondas de correlación hasta estabilizar los rangos en la sección compuesta. Es decir, hasta que se encontró la ocurrencia más antigua y más joven para cada taxón.

Se seleccionaron 92 palinomorfos con alto potencial para correlación bioestratigráfica, es decir, aquellos taxones fácilmente reconocibles que se encuentren en más de un pozo y no tengan mucha variabilidad estratigráfica (Jaramillo, *et al.*, 2009). La secuencia obtenida, fue posteriormente zonificada de acuerdo a los mismos.

La tercera etapa consistió en la calibración de la secuencia zonificada. Para ello se usó información publicada con elementos cronoestratigráficos que pudieran correlacionar las zonas con la tabla del tiempo geológico (Gradstein *et al.*, 2005).

Resultados

Del inventario y evaluación de la información palinoestratigráfica en cuencas Colombianas se logró obtener un conjunto de resultados generales y particulares. Los generales son referidos a aquellos obtenidos de manera simultánea para todas las cuencas y los resultados particulares a aquellos obtenidos para cada una de las cuencas.

Resultados Generales. Se hizo una revisión aproximada de 3.830 archivos del EPIS, contenidos en informes técnicos independientes o asociados directamente a carpetas de pozos considerados potenciales para obtener información palinológica. Así mismo, se revisó un total de 51 publicaciones con información palinológica de las cuales 19 presentaron información de utilidad bioestratigráfica para los fines cuantitativos previstos (Cuartas *et al.*, 2008).

Se pudo definir el valor bioestratigráfico para 531 pozos/secciones en tres categorías: “alto”, “medio” y “bajo” de la siguiente manera: alta (pozos con conteos, 30 pies/muestra, pocas especies informales), media (conteos semicuantitativos o buena densidad de muestreo), y baja

(pocas especies, presencia/ausencia, baja densidad de muestreo, muchas especies informales). La Tabla 1 presenta las estadísticas generales para cada una de las cuencas sedimentarias.

De allí se concluye que, del total de pozos estudiados, sólo aproximadamente el 5% presentan información palinológica y que de estos, la cuenca de los Llanos Orientales representa aproximadamente el 40%. Le siguen las Cuencas del Valle Medio del Magdalena (VMM) y del Valle Superior del Magdalena (VSM) con 17% y el 12% respectivamente (Cuartas *et al.*, 2008). Las cuencas Colombia, Los Cayos, Urabá, Amagá, Tumaco, Chocó Marino y Pacífico Profundo no cuentan con información palinológica y las restantes poseen un número de pozos menor a 10 (Guajira y Guajira Marino).

Estos datos muestran que existe una clara predominancia de estudios palinológicos en las cuencas de los Llanos y del VMM seguidas por las cuencas del VSM y del Caguán-Putumayo. En grado medio se presentan las cuencas de Catatumbo, Cordillera Oriental, Caguán-Putumayo y el Valle Inferior del Magdalena (VIM).

Respecto al número de pies perforados se presenta una situación más equitativa entre las cuencas de los Llanos Orientales y la del VMM, donde la primera representa aproximadamente el 32% y la segunda el 26%. Estos porcentajes son seguidos por las Cuencas del VSM y de la Cordillera Oriental. Igualmente, el número de pies perforados permitiría agrupar las cuencas de Caguán-Putumayo, el VIM y la Guajira en un grupo y las cuencas de Sinú Marino y de Catatumbo en otro.

En lo concerniente a la relación entre el número de especies recuperadas y el intervalo promedio de muestreo por cuenca, se observa, nuevamente, que la Cuenca de los Llanos Orientales presenta una mejor calidad en los intervalos de muestreo y una mayor recuperación de especies. Contrasta con ésta, la Cuenca de Sinú Marino donde los intervalos de muestreo promedio resultaron altísimos y la recuperación de especies muy baja.

Es importante resaltar que el no reporte de especies en una cuenca (Tabla 1) no implica su inexistencia, ya que en algunos casos como el de la Cuenca del Chocó (pozo Buchadó-1), se reportan análisis palinológicos pero el número de especies encontrado no es registrado en los archivos disponibles y en otros casos como el de los pozos Sandi-1 y Tambora-1 de la Cuenca Tumaco Marino, las muestras resultaron estériles.

Resultados por cuenca. Sólo se incluyeron aquellas cuencas con al menos un pozo o sección cuya valoración para los fines cuantitativos propuestos haya sido alta o media.

De las 24 cuencas definidas por la ANH, siete fueron apropiadas para la aplicación del método de optimización con restricciones (Caguán-Putumayo, Catatumbo, Cordillera Oriental, Guajira - Guajira Marino, Llanos Orientales, Valle Medio del Magdalena y Valle Superior del Magdalena). Dos cuencas presentaron un solo pozo/sección (Cesar – Ranchería y Vaupés – Amazonas). Por lo tanto, para éstas no fue posible aplicar la metodología CONOP. Sin embargo, dada la importancia biostratigráfica de la información se presenta la zonación palinológica respectiva.

El número total de pozos/secciones involucrados en este proceso fue de 98 incluyendo aquellos derivados de las publicaciones (Cuartas *et al.*, 2008).

La Tabla 2 presenta un compendio de los resultados obtenidos en esta fase.

Resultados obtenidos para la zonificación del Cretácico más superior (Proyecto Piloto). Se analizó el contenido palinológico de 327 muestras. Los morfotipos más importantes se registraron fotográficamente y se localizaron mediante el sistema England Finder (Jaramillo *et al.*, 2009).

Para el análisis de correlación gráfica se logró definir una sección de referencia con los requerimientos mencionados anteriormente (Jaramillo *et al.*, 2009). Las líneas de correlación para cada sitio permitieron obtener una sección compuesta que incluyó además una medida de confianza para cada evento de acuerdo al método de Jaramillo *et al.*, (2005). Así mismo, la información fue analizada en CONOP obteniendo una secuencia óptima de eventos.

El orden de ambas secuencias fue comparado mediante el coeficiente de correspondencia Tau de Kendall. Este valor resultó bajo ($\tau = 0.44$). Sin embargo, aquellos eventos de mayor importancia presentaron buena correspondencia (Jaramillo *et al.*, 2009).

De esta comparación y con los eventos más congruentes se propusieron tres biozonas (Figura 3): Zona de *Echimonocolpites protofranciscoi*, Zona de *Echimonocolpites pachyexinatus* y Zona de *Buttinia andreevi*.

La zonación palinológica se calibró con la tabla de tiempo geológico de Gradstein *et al.*, (2005). Para ello se utilizaron seis eventos: 1) Anomalía de Iridio, límite Cretácico-

Paleoceno, 65,5 Ma (STRI, en prep.). 2) Primera Aparición (FAD) de *Micula prinsii*, 66,2 Ma (Yepes, 2001b). 3) FAD de *Abathom. mayaroensis*, 68,8 Ma (Martinez, 1989; Martinez & Hernandez, 1992; Yepes, 2001b). 4) FAD de *Gansserina gansseri*, 72,2 Ma (Martinez, 1989; Martinez and Hernandez, 1992; Yepes, 2001b). 5) FAD de *Globotruncana aegyptiaca*, 74,4 Ma (Martinez, 1989; Martinez and Hernandez, 1992; Yepes, 2001b) y 6) Última Aparición (LAD) de *Eiffellithus eximius*, 75,6 Ma (Yepes, 2001b).

En este punto es importante mencionar que el límite Campaniano-Maastrichtiano ha sido modificado recientemente (Gradstein *et al.*, 2005) y algunas zonas de foraminíferos anteriormente consideradas del Maastrichtiano, actualmente son consideradas como del Campaniano Superior (e.g. *G. gansseri*, *G. aegyptiaca*). Por tal razón, el proceso de recopilación de información antigua debe hacerse con precaución.

Conclusiones

De acuerdo al análisis de la información realizado en el marco del proyecto “Inventario y Evaluación de la Información Micropaleontológica en las Cuencas Sedimentarias de Colombia (Caso Palinología)” se concluyó que:

- La Cuenca de los Llanos Orientales posee la mayor y mejor información palinológica. Le siguen en su orden las cuencas del Valle Medio del Magdalena, Valle Superior del Magdalena, Cordillera Oriental y Catatumbo. Otras cuencas, tanto del Pacífico como del Atlántico, el Valle Inferior del Magdalena y la Guajira poseen información palinológica muy escasa y de baja calidad, a pesar del inmenso potencial que podría tener la palinología como herramienta bioestratigráfica y paleoambiental en estas cuencas.
- La zonación para cada una de las nueve cuencas que se derivaron de las secuencias ideales, es en general de baja resolución. Sin embargo, la identificación de los puntos críticos permite mejorar sustancialmente a futuro la información.
- La sistematización de la información palinológica más relevante permitirá incorporarla a futuras campañas de exploración con un valor agregado alto.
- CONOP permite obtener desde un gran número de pozos y en un tiempo relativamente corto resultados de secuencia de eventos de gran utilidad en bioestratigrafía.

- Los resultados obtenidos y la metodología utilizada son una herramienta en la planificación exploratoria de hidrocarburos en el país.
- El número de pozos con información palinológica representa un porcentaje considerablemente bajo (aproximadamente 5%) con respecto al número total de pozos perforados en el país.
- En general, hay una baja densidad de muestreo (en promedio muestras tomadas cada 300 pies), muchas veces de cortos intervalos estratigráficos.
- Se cuenta con muy pocas muestras de afloramiento o de corazón, menos de un 10% de la información palinológica colectada.
- De nueve cuencas que poseen información bioestratigráfica importante, siete se localizan en y hacia el oriente de la cuenca hidrográfica del Río Magdalena.
- Para siete de las nueve cuencas con información palinológica importante se logró determinar la secuencia más óptima de eventos palinológicos de primeras y últimas apariciones. Los eventos de últimas apariciones (LADs) en cada una de las secuencias representa mayor consistencia que los eventos de primeras apariciones (FADs) con respecto al orden de eventos esperados. Esto debido a que aproximadamente el 87% de los pozos resultaron ser de tipo “ditch cutting” donde frecuentemente se presentan caídos.

Con relación al análisis de la información del proyecto “Zonación palinológica para el Maastrichtiano, Cordillera Oriental de Colombia”, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se identificaron tres zonas palinológicas y 92 eventos bioestratigráficos para el intervalo Maastrichtiano-Campaniano más superior de la Cordillera Oriental de Colombia y regiones aledañas.
- La aplicación de distintas aproximaciones a los problemas bioestratigráficos (e.g. CONOP y Correlación Gráfica) permiten generar resultados de mayor confiabilidad.
- Se calibró la zonación usando seis eventos temporales, que permitieron asignar una edad a cada evento de la zonación.

- La metodología empleada permitió definir de manera confiable una secuencia de eventos palinológicos de gran utilidad en la exploración de hidrocarburos.

Recomendaciones

Teniendo en cuenta que se requiere adelantar un programa integral de investigación que permita producir una zonación palinológica confiable para cada una de las cuencas sedimentarias presentes en Colombia, se recomienda realizar estudios bioestratigráficos con las siguientes características:

- El estudio y análisis de al menos cinco secciones por cuenca.
- Para los estudios bioestratigráficos se debe escoger muestras de superficie, núcleo de pozo y rípios de perforación de pozos con bajos niveles de carcavamiento (caving).
- El intervalo de muestreo debería ser como mínimo de una muestra cada 30 pies.
- Conteos cuantitativos, con al menos 200 granos por muestra, cuando el recobro así lo permita.
- Cada especie informal con utilidad bioestratigráfica debe ser descrita, ilustrada, y ubicada en una lámina con el sistema England Finder.
- La zonación debería ser producida a partir de una combinación de técnicas cuantitativas, incluyendo correlación gráfica y optimización por restricciones.
- El trabajo debería desarrollarse en conjunto con otras herramientas cronoestratigráficas (macrofósiles, otros microfósiles, isótopos y magnetoestratigrafía), con el fin de calibrar las zonaciones propuestas.
- Continuar y mejorar la metodología usada en la zonación del Cretácico para producir una zonación confiable para el Cretácico-Cenoico de las cuencas colombianas.

Una investigación de este tipo permitiría establecer una zonación más precisa con grandes aplicaciones para la industria de los hidrocarburos y para el mejor entendimiento de la geología colombiana. Estos nuevos conocimientos tendrían amplia aplicación en la evaluación y mejoramiento de modelos geológicos y permitiría resolver problemas estructurales y estratigráficos en las fases de exploración,

perforación, y desarrollo de campos. Así mismo, permitiría mejorar la confiabilidad en las cartografías de campo, realizar correlaciones estratigráficas, reevaluar pozos que ya han sido perforados, etc. Estas son, entre otras, algunas de las aplicaciones de la palinología para la disminución del riesgo exploratorio con grandes implicaciones económicas durante la exploración.

Un programa investigativo de este tipo debe ser adelantado por universidades y centros de investigación con el apoyo de la industria, ya que los objetivos de las consultorías son en su mayoría puntuales y frecuentemente no aportan al avance del conocimiento bioestratigráfico.

Agradecimientos

Agradecemos a la Agencia Nacional de Hidrocarburos por el apoyo económico al desarrollo de estos dos proyectos y por su acompañamiento técnico y al Banco de Información Petrolera por su buena disponibilidad durante el proceso de descarga de la información. Carlos Cuartas agradece a Lineth C. Contreras y a Johon A. Restrepo por sus sugerencias al escribir este artículo.

Referencias

- Bevc, D., 1997, Imaging complex structures with semirecursive Kirchhoff migration: *Geophysics*, 62, 577-588.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos-ANH., 2007. *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. Edited by ANH and B&M Exploration Ltda. Bogotá.
- Cooper, R. A., Crampton, J. S., Raine, J. I., Gradstein, F. M., Morgans, H. E., Sadler P. M., Strong C. P., Waghorn, D., & Wilson G.J. (2001). Quantitative biostratigraphy of the Taranaki Basin, New Zealand: A deterministic and probabilistic approach. *AAPG Bulletin*, 5 (), 146 -14.
- Cuartas, C., Jaramillo, C., Arjona, A., Silva, S. 2008. Informe final del inventario y evaluación de la información micropaleontológica en las cuencas sedimentarias de Colombia. Contrato ANH-STRI. No. 12-000834-2007-1. Bogotá, p. 211 más Anexos.
- Cuartas, C., Jaramillo, C., Martínez, J. 2006. Quantitative Biostratigraphic Modelo for the Tertiary of the Lower Magdalena Basin, Colombian Caribbean. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro* - Vol. 3 Núm. 2 Dic. 2006.
- Edwards, L.E., 1984, Insights on why graphic correlation (Shaw's method) works: *Journal of Geology*, v. 92, p. 583-597.

- , 1989, Supplemented graphic correlation: A powerful tool for paleontologists and nonpaleontologists: *Palaaios*, v. 4, p. 127-143.
- Germeraad, J.H., Hopping, C.A., and Muller, J., 1968, Palynology of Tertiary sediments from tropical areas: Review of Palaeobotany and Palynology, v. 6, p. 189-348.
- Gradstein, F. M., Agterberg, F. P., Brower, J. C., & Schwarzacher, W. S. (1985). *Quantitative Stratigraphy*. D. Reidel Publishing Company, Unesco, Dordrech, p. 598.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., and Smith, A., 2005, *A Geologic Time Scale 2004*. New York, Cambridge University Press, 610 p.
- Hoorn, C., 1994, Fluvial palaeoenvironments in the intracratonic Amazonas Basin (Early Miocene-early Middle Miocene, Colombia): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 109, p. 1-54.
- Jaramillo, C., Parra, F., Bedoya, G., Cuartas, C., Arjona, A., Romero, M., Mejía, P., Páez, M. 2009. Informe final Zonación palinológica para el Maastrichtiano, Cordillera Oriental de Colombia. Otro Sí al contrato ANH-12-000834-2007. Bogotá, p. 31 más Anexos.
- Jaramillo, C., and Rueda, M., 2008. A Morphological Electronic Database of Cretaceous-Tertiary Fossil Pollen and Spores from Northern South America, Colombian Petroleum Institute & Smithsonian Tropical Research Institute.
- Jaramillo, C., Muñoz, F., Cogollo, M., and Parra, F., 2005, Quantitative Biostratigraphy for the Paleocene of the Llanos Foothills, Colombia: Improving Palynological Resolution for Oil Exploration, in Powell, A.J., and Riding, J., eds., *Recent Developments in Applied Biostratigraphy*: London, The Micropaleontological Society Special Publications, p. 145-159.
- Jaramillo, C., Pardo-Trujillo, A., Rueda, M., Harrington, G., Bayona, G., Torres, V., and Mora, G., 2007, Palynology of the Upper Paleocene Cerrejon Formation, northern Colombia: *Palynology*, v. 31, p. 153-189.
- Jaramillo, C., Rueda, M., and Mora, G., 2006, Cenozoic Plant Diversity in the Neotropics: *Science*, v. 311, p. 1893-1896.
- Jaramillo, C., and Rueda, M., 2008, A Morphological Electronic Database of Cretaceous-Tertiary Fossil Pollen and Spores from Northern South America, Colombian Petroleum Institute & Smithsonian Tropical Research Institute, DVD ROM, 10 gigabytes.
- Jaramillo, C., Oboh, F. and Yepes, O. 1995. Reconstructing paleobathymetric curves from palynofacies analyses of siliciclastics, cherts, and carbonates rocks from nearshore outer shelf depositional systems" Abstracts and Proceedings, 25 AASP Annual Meeting, Ottawa, Canada, p. 15.
- Kemple, W. G., Sadler, P. M. and Strauss, D. J., 1995. Extending graphic correlation to many dimensions: Stratigraphic correlation as constraints to optimization, 65-82. Tulsa: Society for Sedimentary Geology (SEPM) Special Publication 53.
- Martinez, J.I., 1989, Foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironments of the Maastrichtian Colon mudstones of northern South America: *Micropaleontology*, v. 35, p. 97-113.
- Martinez, J.I., and Hernandez, R., 1992, Evolution and drowning of the Late Cretaceous Venezuelan carbonate platform: *Journal of South American Earth Science*, v. 5, p. 197-210.
- Muller, J., Di Giacomo, E., and Van Erve, A., 1987, A palynologic zonation for the Cretaceous, Tertiary and Quaternary of Northern South America: American Association of Stratigraphic Palynologists Contribution Series, v. 19, p. 7-76.
- MySQL 5.1. 2008. Manual de MySQL 5.1. <http://dev.mysql.com/doc/refman/5.1/en/introduction.html>
- Rincón, D., Arenas, J., Cuartas, C., Cárdenas, A., Molinares, C., Caicedo, C., and Jaramillo, C. 2007. Eocene-Pliocene planktonic foraminifera biostratigraphy from the continental margin of the southwest Caribbean. *Stratigraphy* 4: 261-311.
- Sadler, P. M., 2006. Constrained optimization approaches to the paleobiologic correlation and seriation problems: A user's guide and reference manual to the CONOP program family, Version 6.5, Riverside: University of California Riverside.
- Sarmiento, G., 1992, Palinología de la Formación Guaduas - estratigrafía y sistemática: *Boletín Geológico Ingeominas*, v. 32, p. 45-126.
- Shaw, A.B., 1964, *Time in stratigraphy*: New York, McGraw-Hill, 365 p.
- Yepes, O., 2001, Maastrichtian-Danian dinoflagellate cyst biostratigraphy and biogeography from two Equatorial sections in Colombia and Venezuela: *Palynology*, v. 25, p. 217-249.
- , 2001b, Maastrichtian-Danian dinoflagellate cyst biostratigraphy and biogeography from two Equatorial sections in Colombia and Venezuela: *Palynology*, v. 25, p. 217-249.

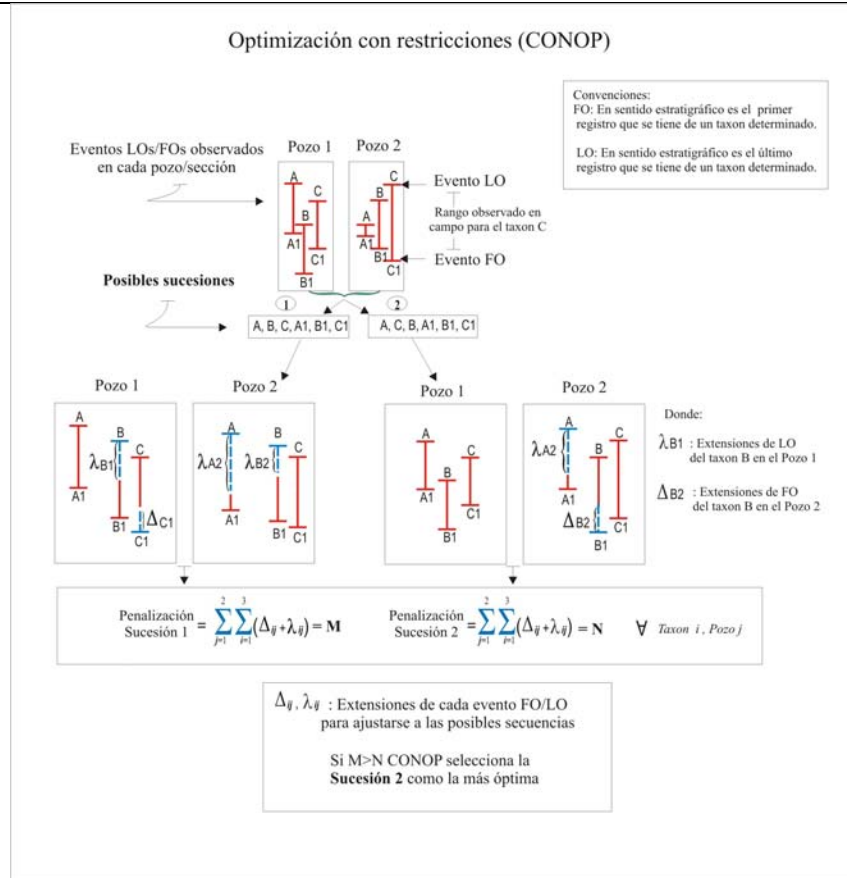


Figura 1. Diagrama esquemático mostrando como funciona CONOP9. Éste genera sucesiones aleatorias y las compara con los datos observados en cada pozo. Luego selecciona, después de muchas pruebas la sucesión que produce la extensión total más baja de los eventos en los pozos (Tomada de Cuartas *et al.*, 2006).

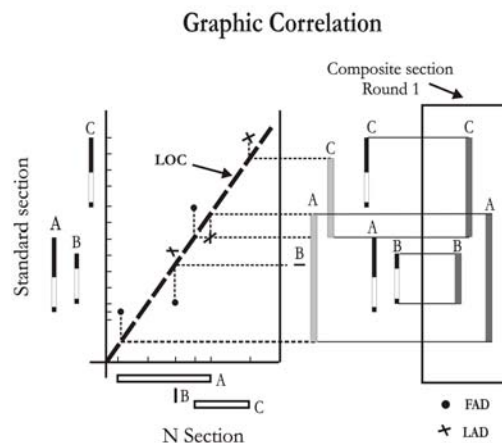


Figura 2. Construcción de una secuencia compuesta de eventos por Correlación Gráfica. El paso inicial combina una sección de referencia, eje Y, y una sección de comparación (eje X) a partir de las cuales se edifica una sección de eventos compuesta mejorada. LOC: Línea de correlación (Tomada de Cuartas *et al.*, 2006).

Piso\Edad Ma.	Este trabajo	Germeraad <i>et al.</i> , 1968.	Muller <i>et al.</i> , 1987.	Sarmiento, 1992.
Daniano				
65.5				
Maastrichtiano tardío	<i>Echimonocolpites protofranciscoi</i>	<i>Proteacidites dehaani</i>	Zona 13	<i>Buttinia andreevi</i>
67.6		?		?
69.4 Maastricht. temprano	<i>Echimonocolpites pachyexinatus</i>		Zona 12	
70.6				
72.3				
Campaniano tardío	<i>Buttinia andreevi</i>		Zona 11	
72.9				

Figura 3. Comparación de la zonación propuesta para el Cretácico Superior de la Cordillera Oriental y regiones cercanas, con otras zonaciones propuestas para el norte de Suramérica. Para la lista completa de taxones ver Jaramillo *et al.*, 2009.

CUENCA ¹	POZOS TOTALES ¹	POZOS PALINOLOGÍA ²	No. ESPECIES	No. MUESTRAS	PIES PERFORADOS	PROMEDIO PIES/MUESTRA
Amagá	0	0	0	0	0	0
Área no prospectiva	12	2	0	48	8440	193
Cagúan-Putumayo	374	27	147	862	70049	73
Catatumbo	850	14	407	762	49452	90
Cauca-Patía	5	1	0	38	3910	103
Los Cayos	2	0	0	0	0	0
Cesar-Ranchería	57	3	186	237	9426	105
Chocó	5	1	0	61	9449	155
<u>Chocó Marino</u>	0	0	0	0	0	0
Colombia	0	0	0	0	0	0
Cordillera Oriental	146	28	537	1490	125574	248
Guajira	29	6	272	431	50680	258
<u>Guajira Marino</u>	48	5	272	175	26658	638
Llanos	1506	206	1052	6125	549902	157
Pacífico Profundo	0	0	0	0	0	0
<u>Sinú Marino</u>	19	4	170	60	46798	995
Sinú-San Jacinto	160	5	170	74	17485	352
Tumaco	2	0	0	0	0	0
<u>Tumaco Marino</u>	3	2	0	23	17238	762
Urabá	5	0	0	0	0	0
Vaupés-Amazonas	4	3	75	62	3236	178
VIM	271	12	47	215	53921	395
VMM	5699	118	341	2638	456405	287
VSM	1210	90	447	1924	210755	132
TOTALES	10407	527	1952	15225	1709378	301

Tabla 1. Estadísticas referentes a la información palinológica para cada una de las cuencas sedimentarias. "Sin": Sin información disponible. *1: ANH (2007), <http://www.epis.com.co/>, 2: EPIS, otras fuentes.

CUENCA	CONOP	No. POZOS	No. POZOS RIPIO	No. POZOS NÚCLEO O SECCIÓN	No. BIOZONAS	RESOL. BIOZONAS
Cagúan-Putumayo	Sí	4	4	0	3	Baja
Catatumbo	Sí	8	5	3	6	Baja
Cesar-Ranchería	No	1	0	1	2	Baja
Cordillera Oriental	Sí	9	7	2	10	Media
Guajira*	Sí	5	5	0	1	Baja
Llanos Orientales	Sí	48	43	5	6	Media
Vaupés-Amazonas	No	1	0	1	2	Baja
VMM	Sí	10	10	0	5	Media
VSM	Sí	12	11	1	5	Media

Tabla 2. Cuencas sedimentarias que permitieron realizar zonificaciones palinoestratigráficas. Obsérvese que de las 9 cuencas zonificadas, 7 obtuvieron una secuencia de eventos mediante CONOP. * : La Cuenca Guajira acá está compuesta por: Cuenca Guajira y Cuenca Guajira Marino. Para una lista completa de taxones en biozonas ver Cuartas *et al.*, 2008.