

ANÁLISIS MINERALÓGICOS Y QUIMIOESTRATIGRÁFICOS APLICADOS EN LA IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS DISTINTIVOS PARA LA DEFINICIÓN DE LÍMITES DE SECUENCIA Y CORRELACIÓN DE INTERVALOS PROSPECTIVOS EN FORMACIONES ORGÁNICAMENTE RICAS, UN CASO EN EL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA, COLOMBIA

Angélica María Carreño Parra¹, Edgar Ricardo Pérez Carrillo¹, María Florencia Segovia²,
Alexandra Milena Ulloa P.³

1: Instituto Colombiano del Petróleo. angelica.carreno@ecopetrol.com.co, ricardo.perez@ecopetrol.com.co

2: Ecopetrol. maria.segovia@ecopetrol.com.co

3: T.I.P. alexandra.ulloa@tipcolombia.com

Palabras clave: Difracción de Rayos X, Fluorescencia de Rayos X, Mineralogía, Elementos mayores, Elementos menores, Quimioestratigrafía

ABSTRACT

This paper presents a mineralogical and chemostratigraphic interpretation developed from the results of X-Ray Diffraction (XRD) and X-Ray Fluorescence (XRF) obtained for 4 wells located in the central zone of the Middle Magdalena Valley basin, Colombia, these analyzes are generated in the laboratories of the Colombian Petroleum Institute (ICP); the information obtained is evaluated and correlated regionally based on the mineralogical proportions and chemostratigraphic aspects such as changes in the curves of major and minor elements and relationships of elements indicating detrital, carbonate and paleo redox contribution; From these correlations, 11 chemostratigraphic zones are proposed in the interval covered by the Olini group (Upper Lidite, Middle Shale, Lower Lidite members) and the La Luna Formation (Galembó, Pujamana, Salada members)..

DESARROLLO

En el marco del Proyecto Piloto de Investigación Integral (PPII) en Yacimientos No Convencionales que se viene desarrollando por Ecopetrol, se han generado análisis de difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (XRF) en muestras de núcleos y ripios, distribuidas en 4 pozos perforados en la parte central de la cuenca VMM (Figura 1). Con el fin de proponer la caracterización mineralógica y elemental de los miembros y unidades operacionales de interés del grupo Oliní y la Formación La Luna, se analizaron 605 muestras de roca para DRX y 297 muestras para XRF, tomadas en porciones de un núcleo y ripios preservados (Tabla 2). Los análisis

realizados corresponden a: DRX (mineralogía bulk y fracción arcilla) y FRX (determinación de la composición química- elementos mayores y menores).

Para los análisis se usó, un difractorio de rayos-X Rigaku modelo Smartlab SE, y un Espectrómetro de Fluorescencia de rayos-X Rigaku Modelo NEX DE, siguiendo los Instructivos Técnicos de Ensayo del Manual de Procedimientos Técnicos del Instituto Colombiano del Petróleo.

La Formación La Luna de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena es una unidad calcárea fina constituida por biomicritas con variaciones graduales a lo largo de la sucesión. Estas variaciones proporcionan las características que permiten definir adecuadamente cada uno de los Miembros (Salada, Pujamana y Galembo). Entre las biomicritas se observan intercalaciones de capas enriquecidas en terrígenos, las que podrían atribuirse al aporte de cenizas volcánicas o bien tener un origen detrítico. Por otro lado, las rocas del Grupo Olini que en campo han sido denominadas tradicionalmente como “cherts” o “liditas” según análisis petrográfico detallado corresponden a biomicritas *wackestone* finamente laminadas que exhiben silificación parcial en láminas y lentes irregulares, producto de la diagénesis (Guerrero, 2000).

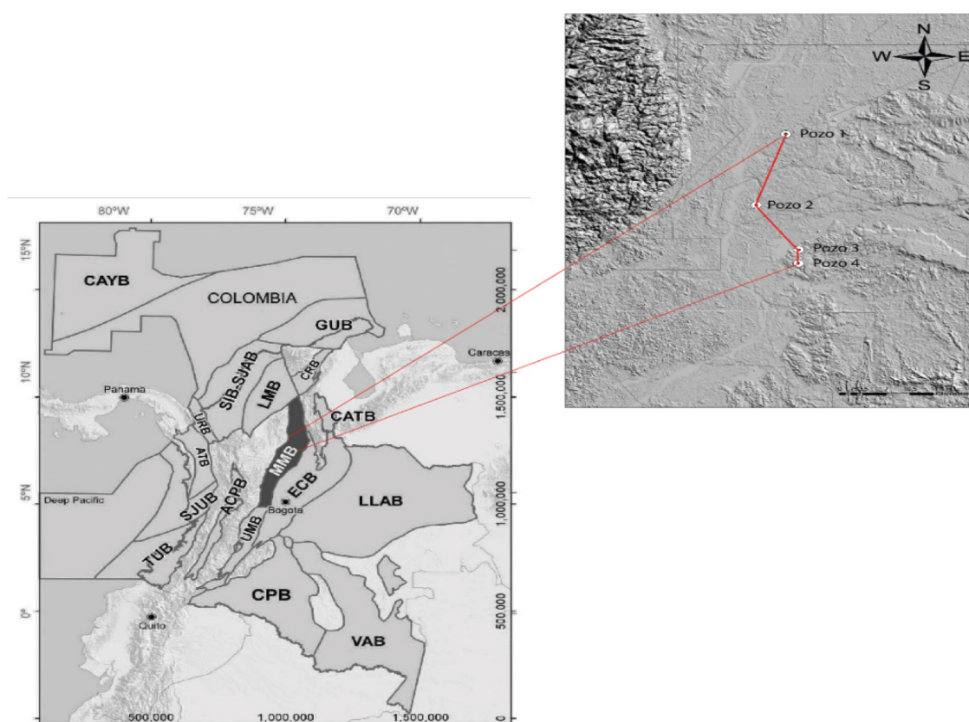


Figura 1. Ubicación geográfica de los pozos analizados en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM). Modificado de Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2007.

ZONAS DEFINIDAS	POZO 1_# Intervalos Analizados			POZO 2_# Intervalos Analizados			POZO 3_# Intervalos Analizados			POZO 4_# Intervalos Analizados		
	DRX-BULK	DRX F<2μ	XRF	DRX-BULK	DRX F<2μ	XRF	DRX-BULK	DRX F<2μ	XRF	DRX-BULK	DRX F<2μ	XRF
	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras	# muestras
Zona XI	9	9	8	10	10	10	14	14	14	21	21	8
Zona X	6	6	6	28	28	28	12	12	11	34	34	10
Zona IX	9	9	9	1	1	1	39	39	-	37	17	-
Zonas VII y VIII	7	7	7	13	13	13	19	19	45	18	6	7
Zonas V y VI	6	6	6	2	2	2	45	45	-	29	9	-
ZONA IV	8	8	8	-	-	-	16	16	-	48	16	-
Zona III	6	6	6	6	6	6	13	13	-	19	7	-
Zona II	5	5	5	15	15	15	27	27	14	24	9	9
Zona I	5	5	5	9	9	9	21	21	29	24	6	6
Total muestras por pozo	61	61	60	84	84	84	206	206	113	254	125	40



Tabla 2. Detalle de las muestras analizadas en los pozos de la zona de interés.

Difracción de Rayos X – Análisis Mineralógicos

El análisis de roca total Bulk (Difracción de rayos X o DRX), se mostró que las mineralogías (normalizadas a minerales arcillosos + cuarzo + carbonatos = 100) presentes para los pozos estudiados reflejan porcentajes promedio que se pueden diferenciar en las 11 zonas propuestas y correlacionar arealmente de Sur a Norte. Por otro lado, a partir del análisis en la fracción <2μ se identificaron fases minerales correspondientes principalmente a: calcita microcristalina, cuarzo microcristalino, minerales arcillosos como interestratificados, illita, caolinita, clorita, estos promedios de fases minerales por zona diferenciada también son correlacionables de Sur a Norte (Figura 2).

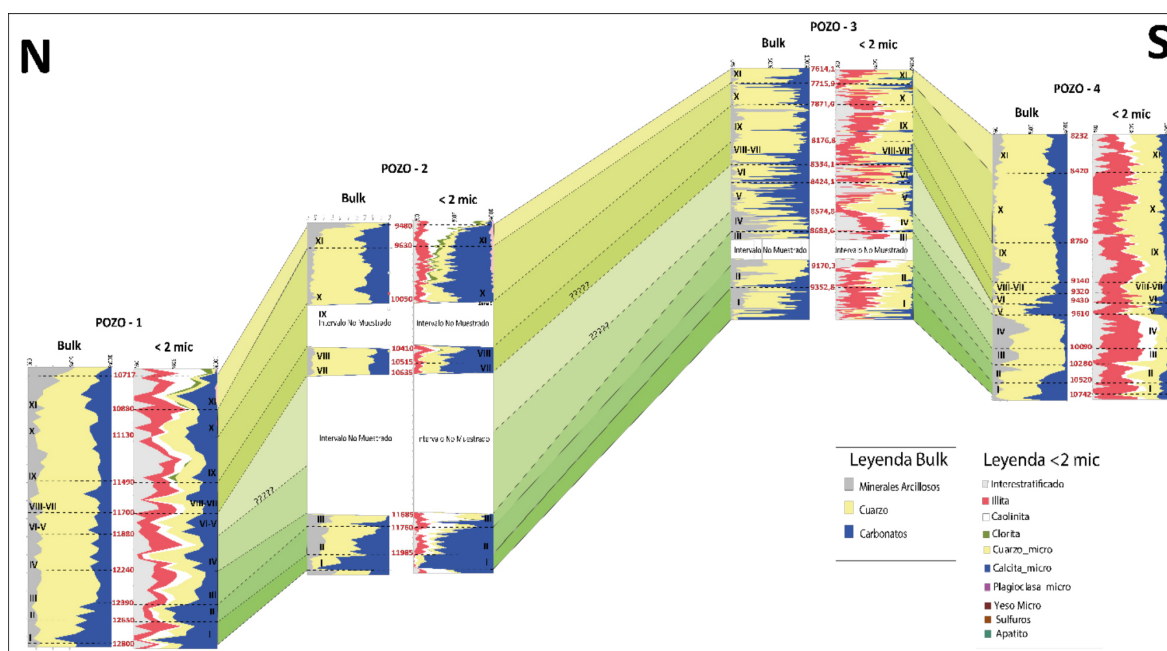


Figura 2. Correlación mineralógica resultados bulk, fracción <2mic, entre los pozos 1, 2, 3, y 4.

Fluorescencia de Rayos X – Análisis Quimioestratigráficos

Los análisis quimioestratigráficos se basan en una sólida comprensión de los procesos que influyen o controlan la abundancia elemental en los sedimentos, es un enfoque analítico utilizado para definir zonas estratigráficas basado en sutiles variaciones elementales. En este avance hemos considerado aquellos elementos y relaciones de elementos que funcionan como indicadores de flujo de sedimentos terrígenos, condiciones redox, variaciones laterales y verticales de elementos; esto como base para generar un patrón quimioestratigráfico de las unidades de interés con el fin de optimizar las operaciones de perforación, fracturamiento y producción de los yacimientos no convencionales en la parte central de la cuenca VMM.

Indicadores Terrígenos. Si, Al, K, Fe, y Ti se encuentran típicamente en minerales que constituyen material detrítico y no se ven afectados por diagénesis o son afectados de menor forma. Estos elementos son comúnmente usados como indicadores de influjo terrígeno a la cuenca, y en la evaluación realizada en este trabajo se han considerado a la hora de generar relaciones con otros elementos y de proponer las 11 zonas que se han correlacionado en los cuatro pozos analizados por DRX/XRF. Hay elementos adicionales que también se utilizan para lo mismo, aunque volumétricamente menos significantes, por ejemplo, Rb, Zr y Nb (entre otros) que pueden ser asociados con minerales arcillosos. La figura 3 refleja las variaciones de las curvas de estos indicadores para el Pozo-1 que es el que presenta la columna cubierta desde Salada hasta Lidita Superior por análisis de fluorescencia de rayos X (XRF).

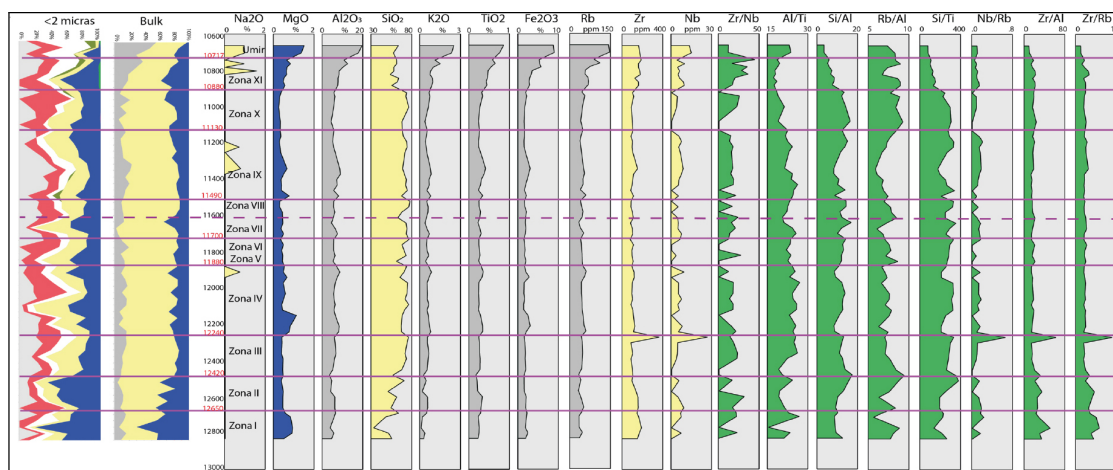


Figura 3. Zonación del Pozo-1 usando datos mineralógicos y XRF. Set de elementos indicadores de aporte terrígeno.

Contenido de Carbonato. El calcio (Ca) es usado como un indicador para contenido de carbonato. Por otro lado, el aluminio, sílice, titanio y potasio (Al, Si, Ti y K) presentan una relación inversa muy marcada con el contenido del carbonato. Los elementos asociados a carbonatos incluyen magnesio, estroncio y manganeo (Mg, Sr, Mn) y la relación Sr/Ca. El Si es

otro constituyente mayor que tiene relación, en este caso inversa con el contenido de carbonato. La Figura 4 refleja las variaciones de las curvas de estos indicadores para el Pozo-1 que es el que presenta la columna cubierta desde Salada hasta Lidita Superior por análisis XRF.

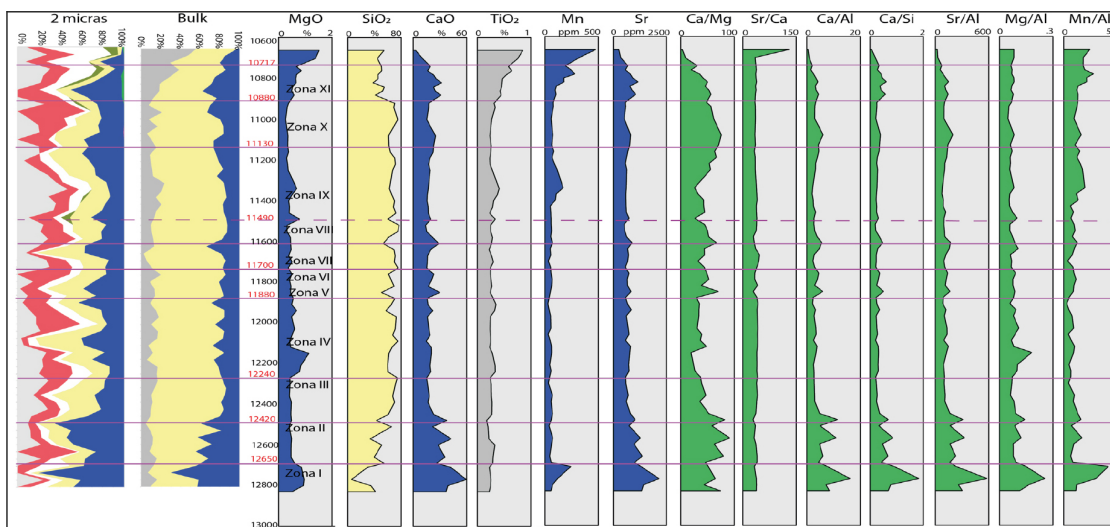


Figura 4. Zonación del pozo 1 usando datos mineralógicos y XRF. Set de elementos indicadores de contenido de carbonato.

Condiciones Redox. Los elementos traza cromo, cobre y molibdeno (Cr, Cu y Mo) se han usado como indicadores de niveles de oxígeno en paleoambientes. Estos elementos redox sensibles son más solubles en condiciones oxidantes; así que los niveles más altos de estos elementos correlacionan con los mayores niveles de anoxia. La Figura 5 refleja las variaciones de las curvas de estos indicadores para el Pozo-1 que es el que presenta la columna cubierta desde Salada hasta Lidita Superior por análisis XRF.

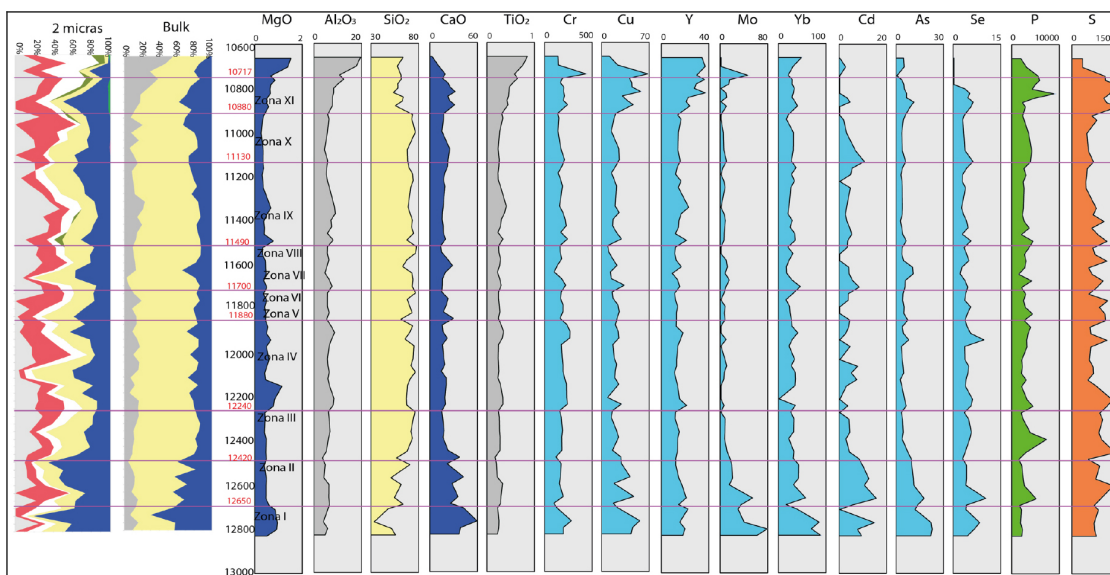


Figura 5. Zonación del Pozo-1 usando datos mineralógicos y XRF. Set de elementos indicadores de ambiente Redox.

RESULTADOS

Cabe mencionar que, de los 4 pozos estudiados, solo los pozos 3 y 4 poseen registro mineralógico por lo que en estos pozos se procedió con la comparación de los elementos estimados por el registro versus la composición elemental obtenida en laboratorio, para verificar el grado de repetitividad y representatividad de los resultados (Fig. 6) y de los resultados de DRX (Fig. 7).

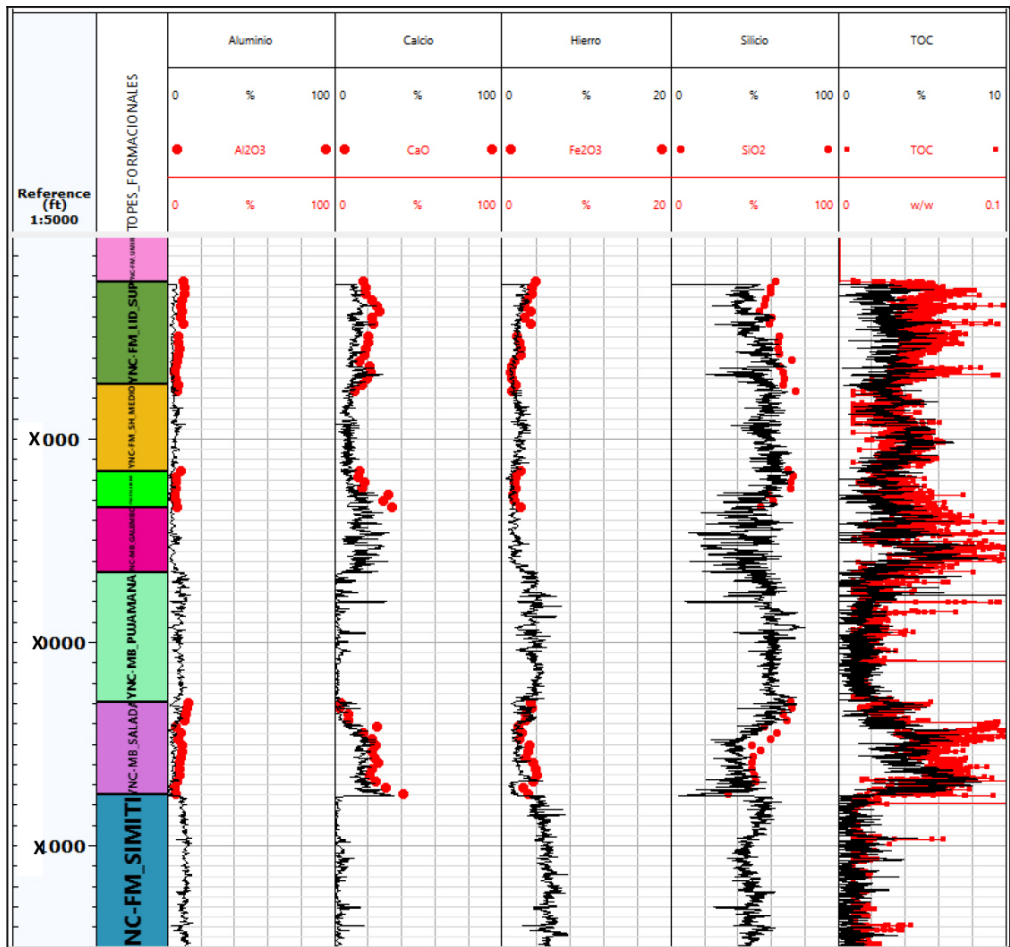


Figura 6. Presentación de los elementos obtenidos en laboratorio y de los mismos elementos obtenidos con el registro de espectroscopía nuclear en el pozo 4.

Si bien se observan algunas diferencias o limitaciones, las tendencias generales de los elementos muestran consistencia con los registros y los volúmenes de minerales estimados con los DRX.

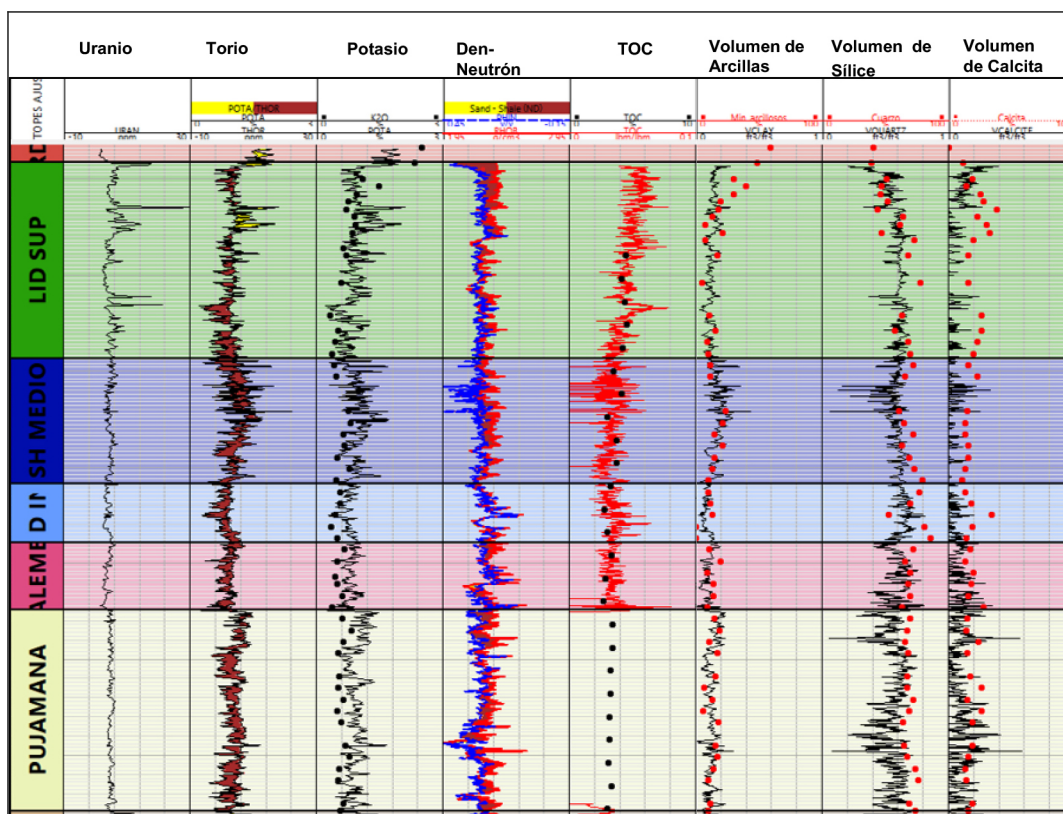


Figura 7. Presentación de los volúmenes minerales obtenidos en el modelo petrofísico y los resultados del DRX (volumen de arcilla, volumen de sílice y volumen de calcita), en el pozo 1.

Zona I. Formación La Luna, miembro Salada. Hacia la base es característico el dominio de carbonatos que va disminuyendo progresivamente hacia el techo (Figura 4). Quimioestratigráficamente se observa disminución de SiO_2 , aumento de CaO , MgO , Sr , Mn (mayor porcentaje carbonatos); valores máximos de indicadores de anoxia como Cu , Cr , Mo (Figura 5); aumento MgO/Al (relacionado con carbonatos, presencia de dolomita, aumento Ca/Si , Ca/Al (Mayor porcentaje carbonato), aumento Sr/Al , Mg/Al , Mn/Al , Fe/Al (relaciones de aporte carbonato / proporción arcilla).

Zona II. Formación La Luna – Miembro Salada. Este nivel se caracteriza de base a techo en los pozos analizados por disminución del porcentaje de carbonato, aumento de base a techo en el porcentaje de cuarzo, porcentaje de arcilla es constante en los pozos de la zona norte, para los pozos del sur el porcentaje de arcilla es variable presentándose picos de hasta 80%. Para el análisis de 2 micras los pozos de la parte norte muestran altos porcentajes de calcita microcristalina y las otras fases constantes durante toda la zona, hacia el sur los pozos 3 y 4 la calcita microcristalina se presenta en muy bajos porcentajes, siendo mayor la presencia de las fases arcillosas illita, caolinita, interestratificado, el cuarzo microcristalino es constante. La zona II presenta un aumento de base a

techo de SiO_2 (Figura 3), disminución progresiva de base a techo de CaO , MgO y Mn relacionada con la disminución del porcentaje de carbonatos (Figura 4). Disminución de base a techo de Cu , Cr indicando una mayor oxigenación del fondo (Figura 5), mientras que el Al_2O_3 se mantiene constante. Disminución de MgO/Al relacionado con un mayor porcentaje arcilloso, (aumenta % de caolinita e interestratificados), disminución Ca/Si , Sr/Al , Mg/Al , Mn/Al , Fe/Al (relaciones de aporte carbonato / proporción arcilla).

Zonas VII - VIII Grupo Oliní – Lidita Inferior. La zona VII y VIII se puede diferenciar mineralógica y quimioestratigráficamente en los pozos 2 y 3, para los pozos 1 y 4 se define una zona conjunta VII-VIII y se describe como un paquete condensado que cumple con los aspectos quimioestratigráficos que la diferencia de las zonas superiores (IX) e inferior (VI). La zona VII-VIII mineralógicamente arranca de base a techo con un aumento en el porcentaje de carbonatos y disminución del cuarzo, el porcentaje de arcilla es constante, para el análisis de 2 micras se observa similitudes en la distribución porcentajes de las fases minerales como disminución de interestratificados, illita, aporte mínimo de caolinita y aumento en el porcentaje de cuarzo microcristalino con respecto a la subyacente zona VI.

Esta zona presenta los siguientes rasgos quimioestratigráficos en los pozos analizados como aumento de base a techo de SiO_2 (mayor aporte detrítico, aumento cuarzo), aumento de Si/Al con porcentajes constantes de Zr y TiO_2 , disminución progresiva de base a techo de CaO , MgO , Mn (disminución de carbonatos), disminución de base a techo de Cu , Cr (mayor oxigenación del fondo), Al_2O_3 se mantiene constante, disminución MgO/Al , mayor porcentaje arcilloso, aumenta porcentaje de caolinita e interestratificados, disminución Ca/Si , Sr/Al , Mg/Al , Mn/Al , Fe/Al (relaciones de aporte carbonato / proporción arcilla).

Zona X. Grupo Oliní – Miembro Lidita Superior. Mineralógicamente la zona X se describe como un paquete homogéneo dominado por un alto porcentaje de cuarzo, seguido de carbonatos y muy bajo porcentaje de arcilla no superior a 10%. Para la fracción < 2 micras el mayor porcentaje lo presenta el cuarzo microcristalino para los cuatro pozos, la calcita microcristalina varía de pozo a pozo, los porcentajes de illita, interestratificado y caolinita son constantes, en Pozo 2 se presenta clorita; como minerales accesorios se presentan plagioclasa, apatito y sulfuros micro (figura 2) Para los pozos analizados es evidente el dominio del porcentaje de SiO_2 , se mantiene casi constante con algunas variaciones mínimas (mayor aporte detrítico, aumento cuarzo), aumento de base a techo de TiO_2 y muy leve en Zr contrario a la curva Si/Al , lo cual puede indicar un aporte terrígeno y relación de Si con algún porcentaje de cuarzo detrítico, los indicadores arcillosos Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 se mantienen en un porcentaje bajo y constante. Indicadores de anoxia Mo , Cu , Cr en muy bajo a inexistente porcentaje se mantienen constantes).

Zona XI. Grupo Oliní – Miembro Lidita Superior. Mineralógicamente el cambio es evidente por el aumento en porcentaje de carbonato en la base que va disminuyendo gradualmente hacia el techo, aumento del porcentaje de arcilla y disminución de cuarzo de base a techo; en la fracción de <2 micras aumenta el porcentaje de caolinita y aparece porcentaje de clorita y plagioclasa en la zona norte barrida por los pozos 1 y 2, para estos dos pozos también es característico el mayor porcentaje de calcita microcristalina sobre el cuarzo microcristalino; por otro lado en el análisis de 2 micras de pozo 3 podemos observar un pico de apatito hacia la mitad del intervalo y una drástica disminución de caolinita, en este pozo prevalece el porcentaje de cuarzo microcristalino sobre la calcita microcristalina, al igual que para el pozo 4, los dos ubicados hacia el sur de la zona analizada.

Quimioestratigráficamente para esta zona también se diferencian los comportamientos para los pozos analizados disminución de SiO_2 de base a techo y aumento de CaO , aumento de base a techo de indicadores de arcilla Al_2O_3 , K_2O y rubidio (Rb). Aumento de base a techo de Cr, Cu, pero no Molibdeno (Figura 5). Picos sobresalientes de fósforo y azufre (P y S) asociados a niveles fosfáticos relacionados en la literatura del grupo Oliní y que son importantes en la Lidita superior. Al_2O_3 , K_2O , Fe_2O_3 y TiO_2 disminuyen a la entrada de la zona XI y se mantiene constante por todo el intervalo, aumento progresivo hacia el techo de las curvas Zr y TiO_2 como indicadores terrígenos y disminución de base a techo de la relación Si/Al (Figura 3).

En análisis de estratigrafía secuencial, se ha soportado adicionalmente en descripciones de muestras en afloramientos (Ballesteros, 2012) y análisis petrográficos realizados en el microscopio electrónico de barrido y en secciones delgadas en muestras de los mismos pozos (Fig. 8).

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la quimioestratigrafía es una herramienta muy poderosa en la prospección de yacimientos no convencionales, ya que permite entender la historia deposicional en un contexto de estratigrafía de secuencia. Los criterios para reconocer las secuencias estratigráficas y sus límites incluyen GR, TOC en combinación con el análisis de elementos y presencia o abundancia relativa de minerales. Los intervalos arcillosos, con abundancia de materia orgánica (o TOC) podrían estar representando los sistemas de mar alto transgresivos (TST) o bien secciones condensadas o superficies de máxima inundación (CS o MFS). Estos tienen superpuestos depósitos con tamaño de grano ligeramente más gruesos, mayor abundancia de cuarzo o carbonato, los que podrían representar los depósitos de nivel de mar alto o HST. Los eventos redox, identificados por altos contenidos de azufre.

A continuación, se comparte la interpretación de secuencias con base en las variaciones de TOC y RHP, realizada por Slatt and Eslinger en 2013 (imagen izquierda), la que muestra consistencia con la interpretación de eventos de anoxia (redox) y disoxia (o de mar alto -HST- y

transgresivos -TST) realizada para el mismo intervalo LaLuna-Olini (imagen derecha) en base al análisis de elementos redox. Las secuencias transgresivas se destacan por mayor contenido de cobre, cromo, azufre, y parecen coincidir con un incremento del volumen de minerales arcillosos y con la presencia de minerales arcillosos ferruginosos (clorita).

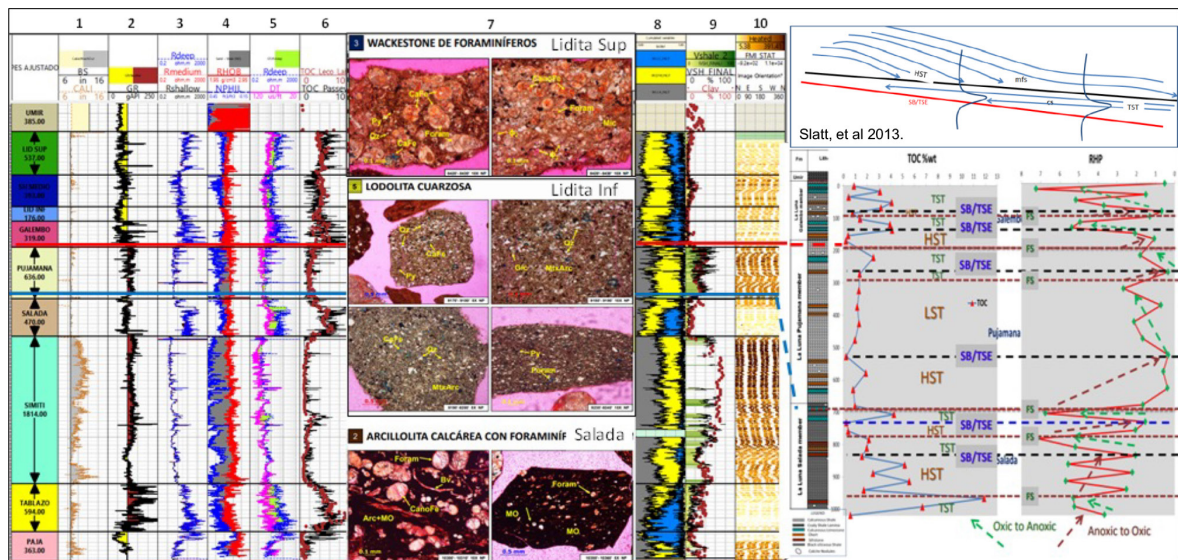


Figura 9. Interpretación de secuencias en el pozo 4: (derecha) con base en los datos de Gr (columna 2), resistividad (columna 3), densidad- neutrón (columna 4), resistividad-sónico (columna 5), TOC (columna 6), descripción petrográfica (columna 7), mineralogía (columna 8), imagen microrresistiva (columna 10). Derecha, interpretación realizada por Roger Slatt en el pozo La Luna-1, ubicado fuera del área de estudio (Figura 1). Las secuencias asociadas a nivel de mar alto se destacan como HST (rojo) y las secuencias transgresivas se destacan en verde (TST).

Por otro lado, el análisis quimioestratigráfico ha permitido explicar el origen del alto contenido de sílice (70% promedio). El *crossplot* circonio (Zr)- sílice (Si) muestra una tendencia positiva sugiriendo un aporte terrestre (y/o hasta volcánico). Esta sílice de origen terrestre se agregaría al cuarzo de origen biogénico, producido por la actividad de seres vivos que componen el zooplankton y el fitoplancton.

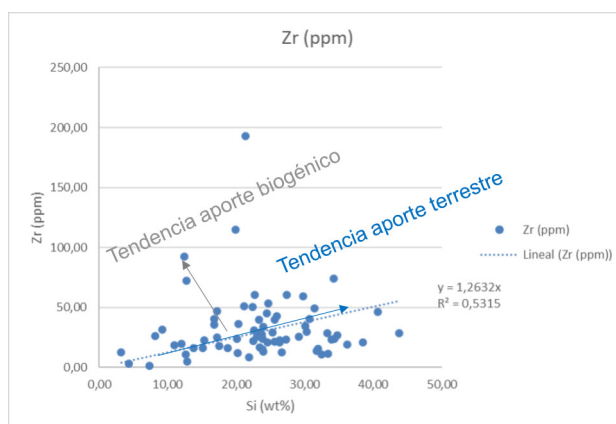


Figura 10. *Crossplot* Zr-Si sugiriendo que la sílice de las formaciones que comprenden el Grupo Olini, tiene un origen terrestre con aporte volcánico, además de un posible aporte biogénico.

AGRADECIMIENTOS

El equipo extiende su agradecimiento a Ana María López Ríos y a Ecopetrol por permitir la publicación de este trabajo. Asimismo, agradecemos a Sandra Patricia Céspedes, a Nelbett Karina Marfisi y a Tatiana Julia Lemus por las valiosas discusiones y aportes a este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Bayona, G., 2018 El inicio de la emergencia en los Andes del norte: una perspectiva a partir del registro tectónico-sedimentológico del Coniaciano al Paleoceno. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 42.
- Guerrero, J., Sarmiento, G. y Navarrete, R., 2000. The stratigraphy of the W side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of selected areas and type localities including Aipe, Guaduas and Piedras. *Geología Colombiana*, Vol. 25. pp. 45-110. Bogotá.
- K. T. Ratcliffe, A.M. Wright, K. Schmidt, 2012. Application of inorganic whole-rock geochemistry to shale resource plays: an example from the Eagle Ford Shale Formation, Texas.
- Sarmiento L, 2011. Petroleum geology of Colombia geology and hydrocarbon potential Middle Magdalena basin. Vol.11. Bogotá.
- Turner W, 2016. Utilization of chemostratigraphic proxies for generating and refining sequence stratigraphic frameworks in mudrocks and shales. University of Oklahoma. Norman, Oklahoma.
- Guerrero, j, Mejía-Molina, A, Osorno., 2020. Detrital U-Pb Provenance, Mineralogy, and Geochemistry of the Cretaceous Colombian, Back-Arc Basin. Volume 2, Chapter 8. *Geology of Colombia*, Vol 2, Mesozoic. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Slatt, R., Eslinger.E., 2013. Observaciones en el núcleo y los registros de La Luna-1. Informe interno Ecopetrol.
- Ballesteros, C., Parra, J., Ortiz, A., 2012. Estudio estratigráfico secuencial para la Formación La Luna en el costado Oriental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena: una visión exploratoria de hidrocarburos no convencionales. Trabajo para optar al título de grado de geólogo de la Universidad Industrial de Santander, Colombia.

