

NUEVA METODOLOGÍA PARA LA INTERPRETACIÓN DE LAS SECUENCIAS TURBIDÍTICAS CON LA UTILIZACIÓN COMBINADA DE HERRAMIENTAS DE SEDIMENTOLOGÍA Y REGISTROS GEOFÍSICOS

NEW METHODOLOGY FOR THE INTERPRETATION OF TURBIDITIC SEQUENCES WITH THE COMBINED USE OF SEDIMENTOLOGY TOOLS AND GEOPHYSICAL LOGS

José HERNÁNDEZ-LEÓN, Olga María CASTRO-CASTIÑEIRA

Centro de Investigación de Petróleo, CubaPetróleo. Churrucá # 481 e/ Vía Blanca y Washington, Cerro, La Habana, Cuba.
E-mail: joseh@ceinpet.cupet.cu; pepehdz1953@gmail.com; olgac@ceinpet.cupet.cu; olgacastro510328@gmail.com

Introducción
Materiales y métodos
Psefitas y psamitas
Pelitas
Rocas carbonatado-arcillosas
Resultados
Discusión y consideraciones finales
Referencias

RESUMEN - Los reservorios de turbiditas son depósitos sedimentarios de aguas profundas, con un potencial significativo para la exploración de hidrocarburos, formados por corrientes de turbidez de alta densidad, cargados de sedimentos que se derrumban desde el talud hacia la cuenca, debido a la gravedad. Entre los principales retos en la caracterización de estos reservorios, está su elevado nivel de heterogeneidad, expresada en variabilidad granulométrica, así como rápidos cambios faciales y deposicionales en todos los sentidos. La interpretación de la litología de estas secuencias mediante el estudio de las muestras de *cuttings* ha constituido siempre un serio problema, ya que es prácticamente imposible la conservación de la matriz que soporta los granos, dada su naturaleza arcilloso-margosa muy friable. Por lo tanto, la utilización y aplicación de técnicas multidisciplinarias es esencial para poder realizar una correcta interpretación y evaluación de estos reservorios. Si se dispone de un complejo de registros geofísicos estándar en estos tramos, es posible calcular la arcillosidad, de modo que se utilizan estos valores para suplir la ausencia de matriz arcillosa en las muestras, lo que hace posible realizar una clasificación correcta y establecer microfácies en estos sedimentos. Esta metodología aplicada a la sedimentología, resulta algo completamente novedoso.

Palabras claves: Turbiditas. Facies. Litología. *Cuttings*. Matriz arcilloso-margosa. Gráfico ternario.

ABSTRACT – Turbidite reservoirs are deep-water sedimentary deposits with significant potential for the exploration and discovery of hydrocarbons. They are formed by dense turbidity currents, which are sediment-laden flows that collapse from the slope into the basin due to gravity. One of the main challenges in characterizing these reservoirs is their high level of heterogeneity, expressed in terms of grain size variability, as well as rapid facies and depositional changes in all directions. The interpretation of the lithology of these sequences through the study of cuttings samples has always been a serious problem, as it is practically impossible to preserve the matrix that supports the grains due to its friable clayey-muddy nature. Therefore, the use and application of multidisciplinary techniques are essential for a correct interpretation and evaluation of these reservoirs. By having a suite of standard geophysical logs in these intervals, it is possible to calculate clay content, which is then used to compensate for the absence of clay matrix in the samples, enabling accurate classification and establishment of microfacies in these sediments. This methodology represents a completely novel approach applied to sedimentology.

Keywords: Turbidites. Facies. Lithology. Cuttings. Marly-argillaceous matrix. Ternary graphic.

RESUMO - Os reservatórios turbidíticos são depósitos sedimentares de águas profundas, com significativo potencial para a busca e exploração de hidrocarbonetos, formados por correntes de turbidez de alta densidade, carregados de sedimentos que colapsam da encosta em direção à bacia, por ação da gravidade. Entre os principais desafios na caracterização desses reservatórios está o seu alto nível de heterogeneidade, expresso na variabilidade granulométrica, bem como nas rápidas alterações faciais e deposicionais em todos os sentidos. A interpretação da litologia destas sequências através do estudo de amostras de corte sempre constituiu um problema grave, uma vez que é praticamente impossível preservar a matriz que suporta os grãos, dada a sua natureza argiloso-argilosa muito friável. Portanto, o uso e aplicação de técnicas multidisciplinares são essenciais para poder realizar uma correta interpretação e avaliação desses reservatórios. Caso um conjunto de registros geofísicos padrão esteja disponível nesses trechos, é possível calcular a argila, portanto esses valores são utilizados para compensar a ausência de matriz argilosa nas amostras, o que possibilita realizar uma classificação correta e estabelecer microfácies nesses sedimentos. Esta metodologia aplicada à sedimentologia é algo completamente novo.

Palavras-chave: Turbiditos. Fácies. Litologia. Estacas. Matriz argilo-margosa. Gráfico ternário.

INTRODUCCIÓN

Las turbiditas fueron descritas en detalle por primera vez por Bouma (1962), que estudió los sedimentos de aguas profundas y reconoció secuencias grano-decrecientes (con el tamaño de sus partículas decreciendo hacia arriba), incluyendo conglomerados de cantos rodados en la base y

lutitas de grano fino en las partes más superiores. Esto era inesperado, porque históricamente se había supuesto que en el fondo de los océanos no existe ningún mecanismo mediante el cual transportar sedimentos de grano grueso a profundidades abisales.

El Ciclo de Bouma comienza con una superficie de erosión que pasa de guijarros a grava en una matriz de arena. Por encima de estas capas se depositan capas de arena cada vez más fina alternada con arena limosa, y, por último,

limo y arcilla. Esta sucesión vertical de capas sedimentarias y el cambio de litología denota una disminución de la turbulencia del flujo del agua que los transporta antes de la sedimentación.

Es inusual observar un Ciclo de Bouma completo: las sucesivas corrientes de turbidez suelen erosionar secuencias anteriores no consolidadas. Por otra parte, si la sección expuesta se encuentra en el borde del lóbulo deposicional, sólo están presentes las secuencias más finas (Bouma, 1962, Figura 1).

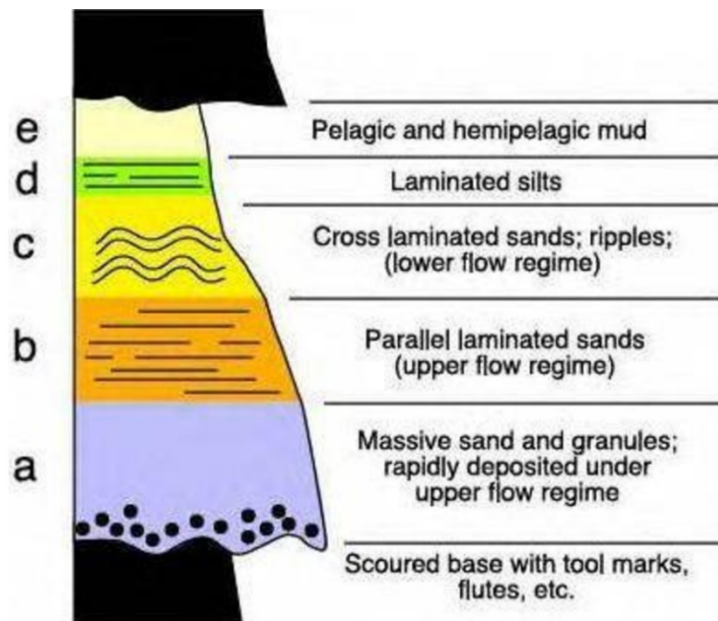


Figura 1 - Secuencia de Bouma (Bouma, 1962).

Los reservorios de turbiditas son depósitos sedimentarios con un potencial significativo para la exploración de hidrocarburos. Estos se forman por corrientes de turbidez de alta densidad, consistentes en fluidos cargados de sedimentos que se derrumban desde el talud hacia la cuenca, debido a la gravedad. Hallazgos recientes han demostrado que aportes de sedimentos desde ríos hacia la plataforma y la cuenca mediante flujos hiperpícnicos, pueden producir tanto turbiditas “clásicas” intracuencales, íntegramente marinas, así como turbiditas extracuencales o hiperpícnicas, que pueden depositar sus materiales tanto en la cuenca como en la plataforma (Zavala et al., 2013, Figura 2).

Las turbiditas intracuencales se originan por una inestabilidad gravitacional que se produce dentro de la cuenca, generando un flujo de detritus más o menos coherente, dependiendo del volumen de agua del ambiente que éste incorpore. Cada uno de los tipos de flujos generados dará origen a diferentes facies, las

cuales son, en general, polimodales y mal seleccionados (Zavala, 2013).

En el caso de las turbiditas extracuencales, se considera que sistemas fluviales pueden generar descargas de elevada concentración de sedimentos que, al entrar en una cuenca, formarán lóbulos turbidíticos en las zonas más profundas, o lóbulos de plataforma cuando se depositan en ésta. Se han reportado estos flujos relacionados con la desembocadura de sistemas fluviales, los que han depositado materiales a más de 700 km de la desembocadura, con casi 4.000 metros de profundidad de la cuenca (Zavala, 2013). Se consideran como requisitos esenciales para el desarrollo de abanicos submarinos, donde se desarrollan las turbiditas: 1) una fuente importante de sedimentos; 2) un valle submarino capaz de concentrar y conducir los sedimentos y 3) una ruptura de pendiente que permita la pérdida de la capacidad de transporte de las corrientes, dando lugar al depósito de los sedimentos (Maldonado & Ruiz-Ortiz, 1982).

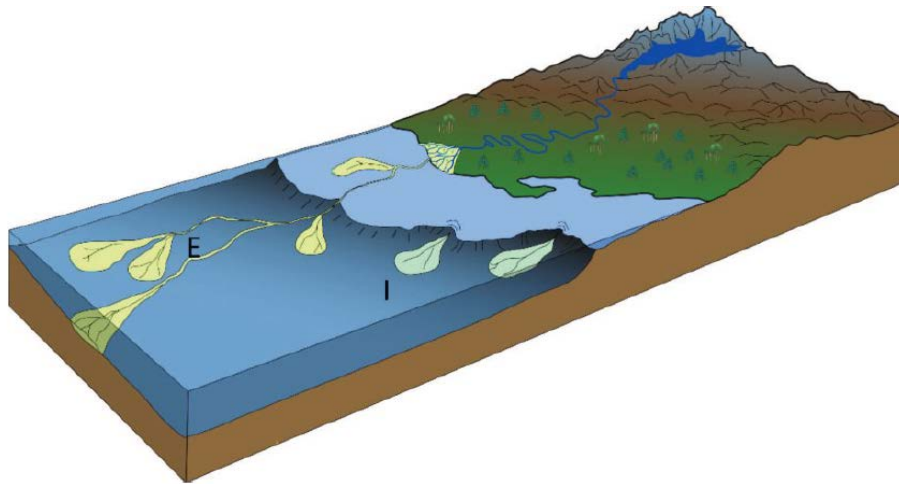


Figura 2 - Turbiditas intracuencales (I) y extracuencales (E) (Zavala, 2013).

Aunque, por razones de confidencialidad, se ha omitido la ubicación y los nombres reales de los pozos seleccionados para la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo, se puede afirmar que éstos cortan secuencias turbidíticas de tipo extracuencales, ya que son pozos dirigidos hacia el mar, con desplazamientos horizontales cercanos a los 2 km, en una zona costera donde la plataforma tiene sólo unas decenas de metros de ancho. Las secuencias estudiadas por estos pozos tienen una edad paleogénica.

Uno de los principales retos en la caracterización de estos reservorios es su elevado nivel de heterogeneidad, expresada en variabilidad granulométrica, así como rápidos cambios faciales y deposicionales en todos los sentidos. La relativa abundancia de matriz arcillosa en muchas de las secciones de turbiditas, que es una expresión de su inmadurez textural, es también un factor que dificulta su estudio.

Para la determinación estructural de estos depósitos, se emplean métodos sísmicos de alta resolución, que permiten a los especialistas determinar estructuras tales como lóbulos, canales y diques, construir modelos tridimensionales de la arquitectura de los reservorios, así como la comprensión de la distribución espacial y conectividad de las unidades cargadas de hidrocarburos.

Complementando esta información, se emplean datos provenientes de los pozos, lo que incluye los registros geofísicos, que permiten la caracterización de las propiedades de los reservorios y sellos, tales como porosidad, contenido de arcilla y saturación de fluidos, las cuales son fundamentales para la estimación de su productividad.

Adicionalmente, se emplean datos de los núcleos cortados durante la perforación, que

proveen información valiosa sobre las facies sedimentarias y propiedades petrofísicas, lo cual apoya también a la calibración de los métodos indirectos mencionados. Sin embargo, los elevados costos de estos tipos de muestras son una limitante importante para la obtención de la información necesaria para realizar una correcta interpretación de secuencias de elevada complejidad y variabilidad, como son las turbiditas. Aunque se tomen muestras de núcleos de los intervalos más interesantes, siempre va a ocurrir que en muchos tramos solamente se cuenta con muestras de *cuttings*.

La obtención de los *cuttings* o ripios de perforación son una necesidad ineludible de la perforación, ya que es imprescindible su extracción para mantener el caño del pozo adecuadamente limpio. Esto hace que su costo sea relativamente bajo y permita tener una fuente de información continua de la columna geológica del pozo durante la perforación, lo que en muchas ocasiones constituye la única fuente de información de que se dispone para realizar la descripción petrográfica de la misma.

Se ha demostrado que, en las secuencias clásticas de origen turbidítico, las rocas terrígenas son francamente predominantes, acompañadas de una gran variabilidad en cuanto a granulometría y composición, así como carácter polimodal y marcada inmadurez textural. Sin embargo, todas las rocas clásticas que han sido clasificadas en el presente estudio microfacial tienen otras cualidades comunes: en las muestras de *cuttings* aparecen como no consolidadas o con muy bajo nivel de cementación, debido a que la matriz que las soporta es un material friable, de composición básicamente arcillosa, la que se incorpora al fluido de perforación, y el remanente que pueda

quedar, es posteriormente removido por completo durante el lavado y preparación de las muestras. En otras palabras, sólo se observan los granos, mientras que la matriz está ausente de las

muestras. Esto constituye una gran dificultad cuando se trata de clasificar estas rocas, ya que es imprescindible para esto conocer la relación volumétrica matriz/fragmentos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio detallado de la litología de los pozos seleccionados constituye el soporte sobre el que se basa el análisis facial y el establecimiento de las microfacies. Para ello deben escogerse pozos con un buen espectro de muestreo, de al menos cada cinco metros y un complejo de registros geofísicos estándar. Los topes de cada uno de los intervalos deben ser cuidadosamente amarrados mediante los registros geofísicos, lo cual permite hacer una evaluación segura de las características petrofísicas de cada una de las microfacies encontradas en el corte.

Esta metodología está diseñada para aplicarse sólo con muestras de *cuttings*, por lo que es imprescindible, tratándose de rocas clásticas no consolidadas que, durante la descripción de los mismos, se expresen claramente los porcentos que corresponden a grava y arena. El material no consolidado con granulometría menor que 0.06 mm (que es el límite superior de la categoría granulométrica limo), deberá despreciarse, ya que usualmente tales granos no se recuperan durante el lavado. Del mismo modo, en este tipo de muestras por su propia naturaleza y características, usualmente no es posible observar la textura de las rocas.

Entonces, para desarrollar estos trabajos sobre secuencias siliciclásticas no consolidadas en muestras de *cuttings*, es necesario:

1. Una detallada descripción de las muestras, que incluya la composición de los fragmentos y sus proporciones relativas, sus texturas y su granulometría, con los porcentajes de grava y de arena claramente expresados. Si se tratara de rocas con cierta cantidad de componente carbonatado (calcita o dolomita), pueden utilizarse los resultados de los análisis de calcimetría que se realizan a pie de pozo.

2. Complejo de registros geofísicos estándar, con la finalidad de poder calcular el contenido de arcilla libre y realizar la evaluación de las propiedades petrofísicas de cada intervalo. En el caso de requerirse una evaluación con inmediatez, pueden realizarse los cálculos de arcilla libre mediante los registros gamma LWD (*Logging While Drilling*), que se realizan durante la perforación de los pozos, aunque este sería un

método muy aproximado, ya que el gamma medido en el LWD es el gamma total, que incluye el contenido de Uranio.

Deberán ser estudiadas todas las muestras disponibles, preferiblemente en pozos que tuvieran un muestreo de calidad (cada 5m como mínimo). La división en pequeños paquetes litológicos que se obtiene de esta manera, es cuidadosamente amarrada mediante los registros geofísicos de estos intervalos, obteniéndose así un fundamento sólido para realizar el análisis estadístico de los datos. Esto permite la determinación de las microfacies con un elevado grado de precisión, de modo que es posible clasificar y estudiar aún aquellas con sólo pocos metros de espesor.

Debe comenzarse con la definición de grandes facies, o simplemente litofacies, las que pueden ser divididas en varias microfacies, en dependencia de las variaciones de su composición litológica, granulometría o relación volumétrica entre los fragmentos y la matriz.

El contenido de arcilla, arcillosidad o volumen de arcilla, se puede obtener a partir de los registros geofísicos. Los registros radiactivos naturales o inducidos, los métodos eléctricos, sínicos o el conjunto de dos o más métodos, son indicadores de arcilla, con los que se puede evaluar este parámetro (Crain, 1986). En el presente trabajo se seleccionó el registro gamma espectral, específicamente la curva de torio + potasio (Gamma Computado, CGR) por ser el mejor indicador de la presencia de esta roca, que se caracteriza por los valores altos de los elementos señalados. Se utilizó el modelo lineal, donde se calcula el volumen de arcilla según la siguiente ecuación para un corte sedimentario típico (Schlumberger, 1982):

$$\Delta I_{gr} = \frac{CGR_{log} - CGR_{min}}{CGR_{max} - CGR_{min}}$$

Donde

ΔI_{gr} es el parámetro duplo-diferencial, relacionado directamente con el volumen de arcilla libre, CGR_{log} el valor promedio del registro gamma para ese intervalo, CGR_{max} el valor más elevado, correspondiente a una zona con 100% de arcilla y CGR_{min} el valor más bajo, frente a una

roca limpia. La clasificación de las areniscas ha sido un tema muy controvertido por muchos años. Se han realizado varios intentos de clasificación de estas rocas, tomando en consideración la composición de sus fragmentos y el volumen de matriz que los soporta.

Se destaca entre las primeras, que se muestran

en la figura 3, las clasificaciones de Pettijohn, 1949, 1954, 1957), Gilbert (1954) y Packham (1954), Dapples, Krumbein y Sloss (1953) en la primera del siglo pasado, presentados en forma histórica y resumida en la Figura 4 (Beck & Crook, 2024). Más recientemente se publicaron las de Crook (1960), Dott (1964) y Folk (2002).

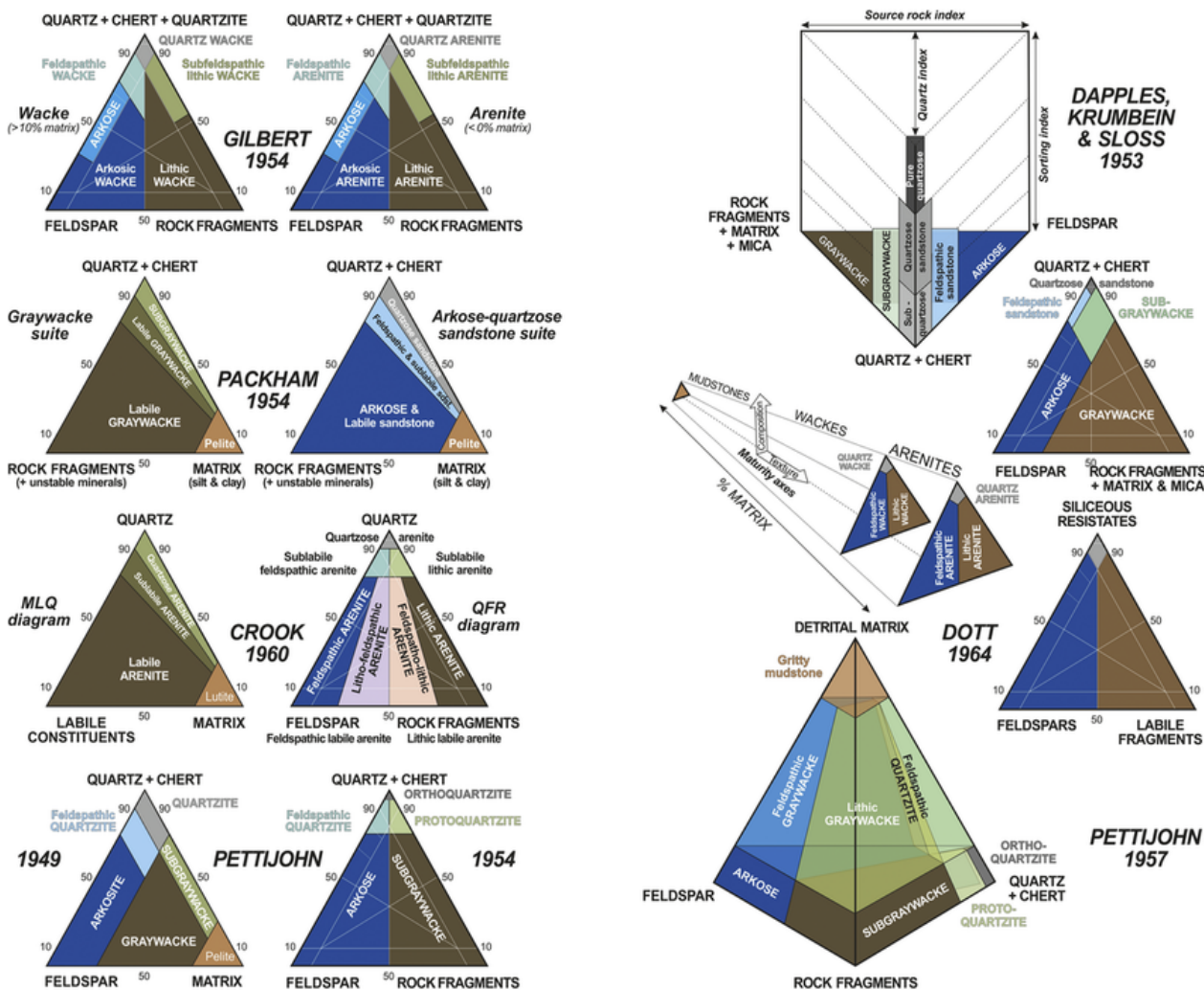


Figura 3 - Historia de las principales clasificaciones de las areniscas (Beck & Crook, 2024).

Sin embargo, para la clasificación de estas rocas, se han utilizado como base, las clasificaciones de Dott (1964), modificada posteriormente por Pettijohn (1983) y Segura (1999), por considerarse una de las más sencillas, que es fácilmente aplicable prácticamente en el estudio de las rocas siliciclásticas en cualquier escenario.

En cuanto a la granulometría, la universalmente aceptada y ampliamente utilizada Escala Granulométrica de Udden (1914), modificada posteriormente por Wentworth (1922) y finalmente actualizada por Terence & McPherson (1999), (ver Figuras 4 a 7).

Psefitas y psamitas

Primeramente, se aplica esta metodología para

las rocas clásticas de grano grueso y medio, es decir, las psefitas (conglomerados y brechas), cuyos granos son mayores de 2mm y las psamitas (areniscas), con una granulometría entre 2 y 0.0625mm.

En una hoja de cálculos, con las fórmulas adecuadas propuestas por los autores, puede realizarse el análisis de cada facies de forma rápida.

La descripción de las muestras debe incluir una detallada clasificación de los granos en lo referente a su composición, textura (granulometría, redondeamiento) y la cantidad porcentualizada de arena y grava, de modo que se pueda expresar como sigue para cada uno de los intervalos determinados:

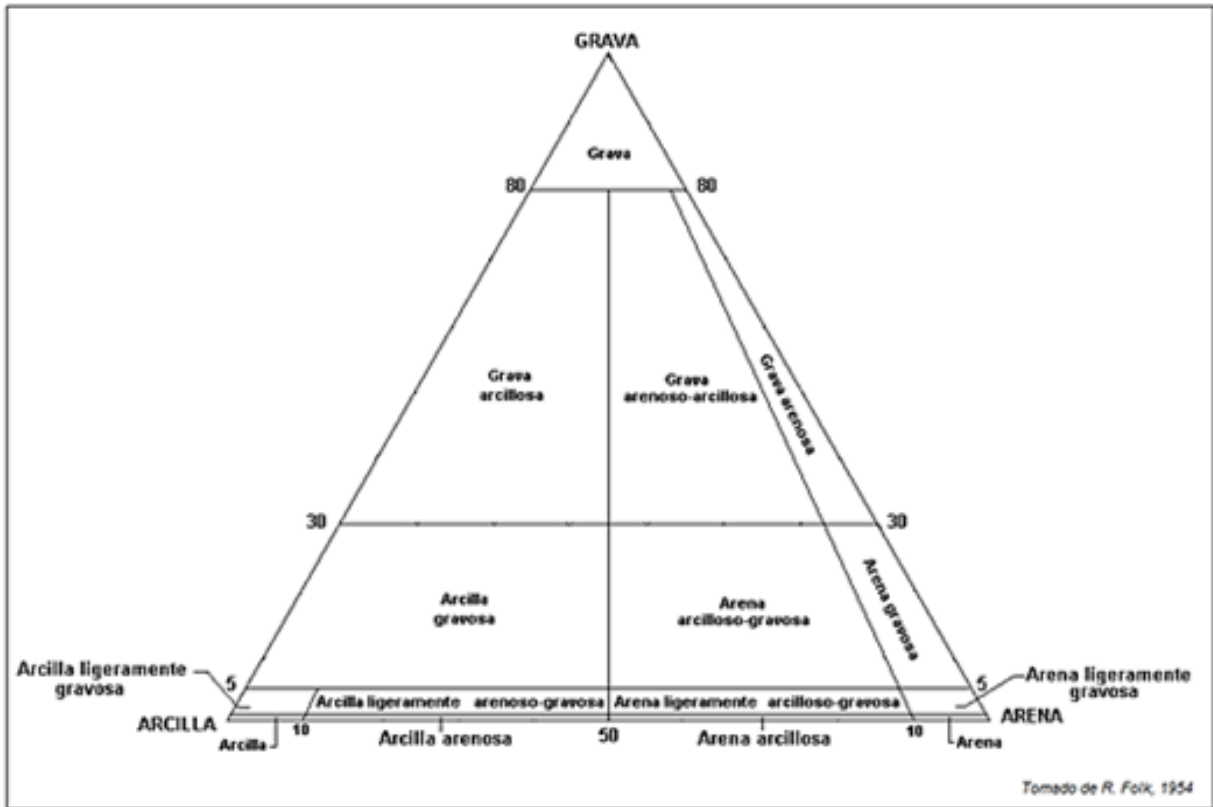


Figura 4 - Clasificación de los sedimentos siliciclásticos en correspondencia con las proporciones de grava, arena y arcilla (Folk, 2002).

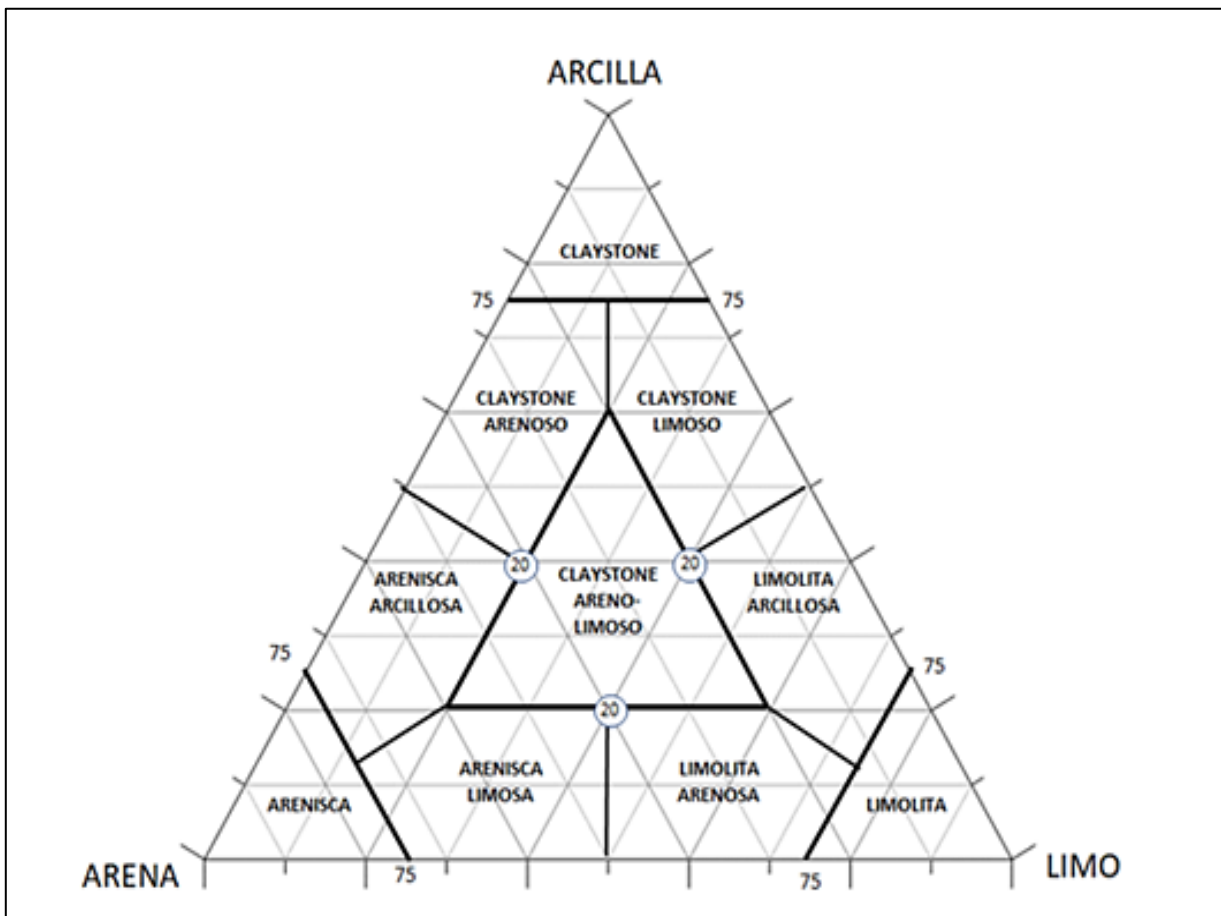


Figura 5 - Clasificación de los sedimentos siliciclásticos arcilloso-limosos, en correspondencia con las proporciones de arena, limo y arcilla (Pettijohn et al., 1973, Pettijohn, 1983).

Milímetros	µm	Clases Granulométricas
4096		Canto
1024		
256		
64		Guijarro
16		
4		
3.36		Gránulo
2.83		
2.38		
2.00		
1.68		
1.41		Arena muy Gruesa
1.19		
1.00		Arena Gruesa
0.84		
0.71		
0.59		Arena Media
1/2 - 0.50	500	
0.42	420	
0.35	350	
0.30	300	
1/4 - 0.25	250	Arena Fina
0.210	210	
0.177	177	
0.149	149	Arena muy Fina
1/8 - 0.125	125	
0.105	105	
0.088	88	
0.074	74	
1/16 - 0.0625	63	Limo Grueso
0.0530	53	
0.0440	44	
0.0370	37	
1/32 - 0.0310	31	Limo Medio Limo Fino Limo muy Fino
1/64	0.0156	
1/128	0.0078	
1/256	0.0039	
0.0020	2.0	Arcilla
0.00098	0.98	
0.00049	0.49	
0.00024	0.24	
0.00012	0.12	
0.00006	0.06	

Figura 6 - Escala granulométrica de los sedimentos clásticos (Wentworth ,1922 y Terence & McPherson, 1999).

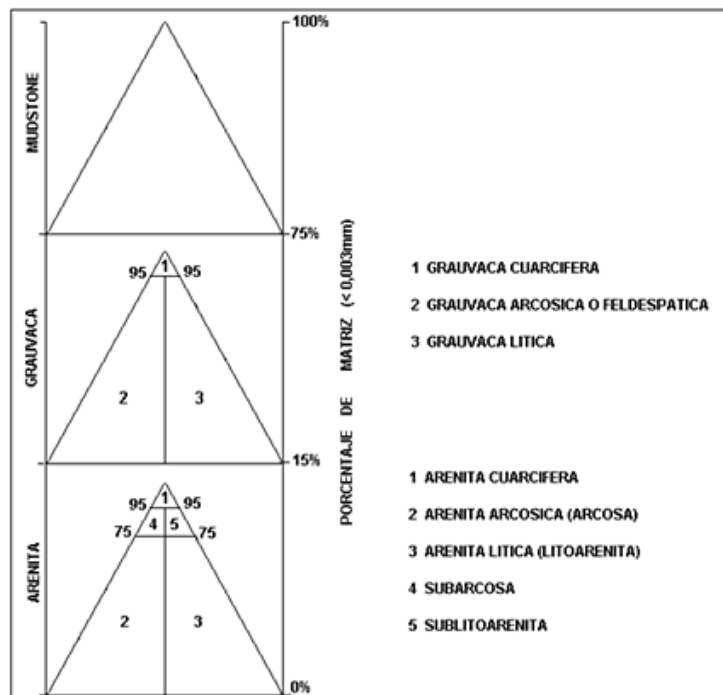


Figura 7 - Clasificación de las areniscas atendiendo a la composición de sus fragmentos y la proporción volumétrica de éstos con la matriz (Segura, 1999).

$$T_{gr} = Gr\% + Ar\% = 100\%$$

Donde T_{gr} sería el total de granos, mientras que $Gr\%$ y $Ar\%$ son los porcentos de grava y arena, respectivamente.

A partir de la obtención de estos valores, se procede a ajustar el valor de T_{gr} (que es siempre 100%) con el contenido de arcilla libre, mediante una simple sustracción de éste último a T_{gr} (se

$$\frac{(T_{gr}' \times G\%)}{100} + \frac{(T_{gr}' \times Ar\%)}{100} + V_{ar} = 100\%$$

Como ejemplo, en un intervalo se ha calculado que existe 40% de grava y 60% de arena.

$$T_{gr} = Gr\% (40) + Ar\% (60) = 100\%$$

El siguiente paso sería ajustar ese valores de 100% al porciento de arcilla libre y obtener los

$$T_{gr} (100) - V_{ar} (25) = T_{gr}' (75)$$

$$\frac{T_{gr}' (75) \times G\% (40)}{100} + \frac{(T_{gr}' (75) \times Ar\% (60))}{100} + V_{ar} = 100\%$$

$$30\% + 40\% + 25\% = 100\%$$

Así, la roca del ejemplo estará formada por 30% de grava y 45% de arena, con 25% de matriz arcillosa.

obtendría T_{gr}').

$$T_{gr} - V_{ar} = T_{gr}'$$

El número obtenido se multiplica por los valores de $Gr\%$ y $Ar\%$ y se porcentualiza, de modo que la suma de ambos números más V_{ar} sumará 100%, lo cual representa el volumen real de grava, arena y arcilla para la facies que se trate.

Además, para el mismo, el contenido de arcilla libre es de 25%. Entonces:

valores ajustados de grava y arena, lo que sería así que:

Para finalizar, los valores de arcilla, grava y arena, componentes de las rocas en cada intervalo, se plotean en el ternario de la figura 8.

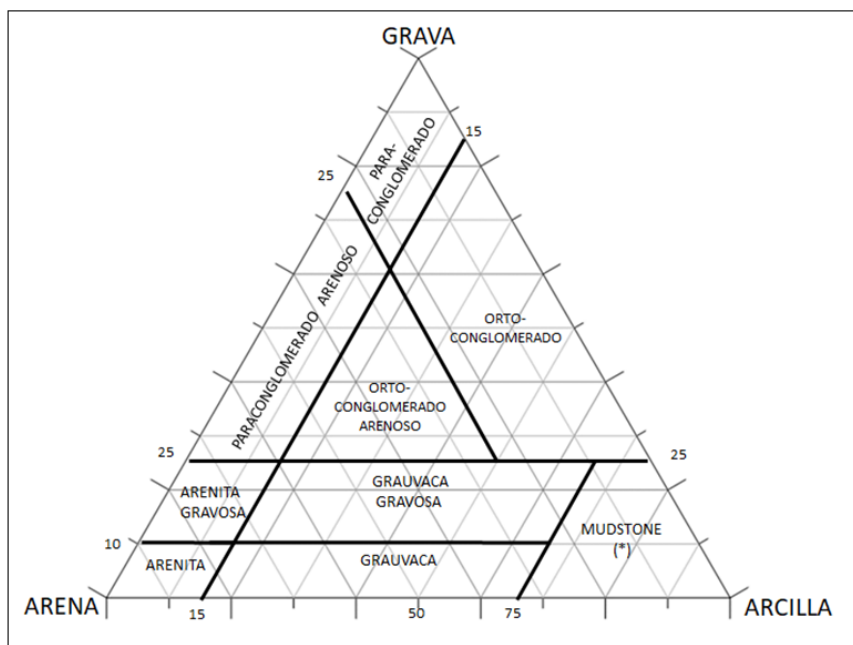


Figura 8 - Gráfico ternario para la clasificación de las rocas clásticas de grano medio y grueso.

Pelitas

Se conocen como pelitas las rocas clásticas de grano fino. Los sedimentos que se hallan en esta categoría pueden ser limosos (con granulometría entre 0.0625 y 0.0039 mm), o arcillosos (granulometría menor de 0.0039 mm (Wentworth, 1922).

Como se ha expresado en párrafos anteriores, las secuencias turbidíticas, por su carácter caótico, suelen estar acompañadas de sedimentos arcilloso-limosos en cantidades considerables, los cuales funcionan como soporte de los granos de mayor granulometría.

Aunque la mayor parte de estos materiales de

grano fino se destruyen durante la perforación y no se recuperan, ocasionalmente se pueden encontrar determinados espesores de rocas tales como *claystone* y limolitas que se conservan y pueden ser descritos en las muestras de *cuttings*.

La principal dificultad para la clasificación de las pelitas es justamente su granulometría. Una buena parte de los fragmentos quedan por debajo de la resolución de los microscopios que se

emplean usualmente para la descripción de los *cuttings*. Sin embargo, otra de las características comunes a estas rocas, es que los sedimentos de grano fino frecuentemente están mezclados con materiales de granulometría más gruesa, como arena y grava, lo cual genera una dificultad adicional para la clasificación correcta de este grupo. Las clasificaciones clásicas para estas rocas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 - Clasificación y nomenclatura de las pelitas (Segura, 1999).

NO CONSOLIDADO		CONSOLIDADO			
		SIN FISILIDAD		CON FISILIDAD	
LODO (sedimento, <0.06 mm)	LIMO (0.06-0.004 mm)	MUDSTONE	LIMOLITA	LUTITA	ARGILITA (metamorfismo incipiente)
	ARCILLA (<0.004mm)		CLAYSTONE		

Sin embargo, el porcentaje de material arenoso es fácilmente identificable en las muestras.

Si se dispone del porcentaje de arcilla libre obtenida mediante los cálculos correspondientes, se puede inferir que el complemento de ese total

(arena más arcilla), corresponde a la fracción limosa. Entonces, se puede hacer una determinación muy precisa del nombre de la roca, mediante el gráfico ternario que se muestra en la figura 9.

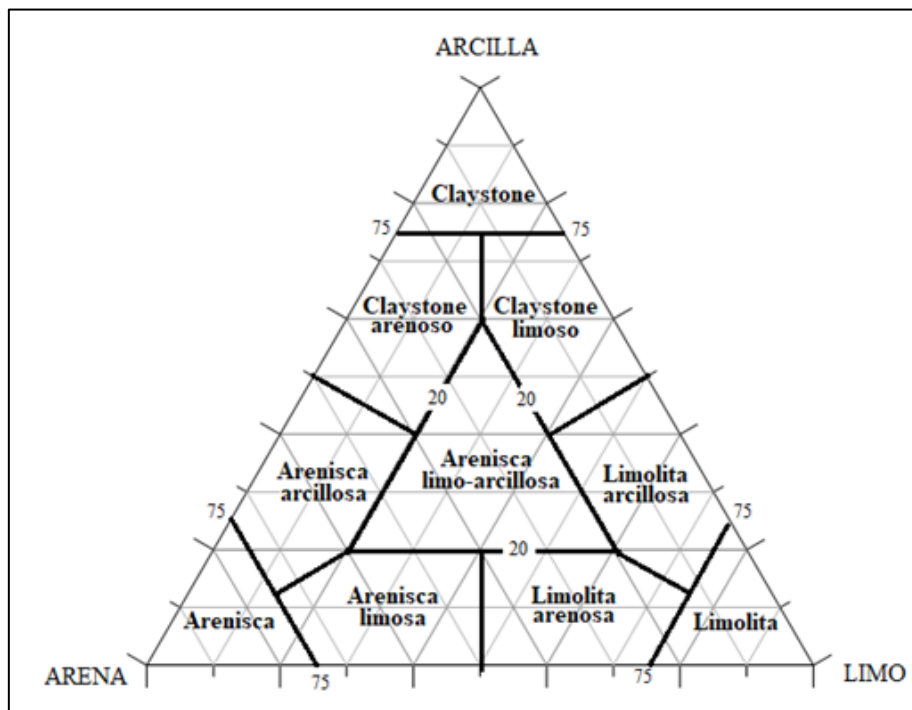


Figura 9 - Ternario para la clasificación de las rocas formadas por la mezcla de arena, limo y arcilla (Hernández-León et al., 2020).

Se debe tener en cuenta durante las observaciones que, si la roca tiene una textura micromicácea, se trata del resultado de un metamorfismo incipiente, por lo que esta roca no está incluida en el gráfico de la figura 9 y deberá denominarse argilita, de acuerdo con la clasificación de la tabla 1.

Rocas carbonatado-arcillosas

La determinación de las rocas carbonatadas y carbonatado arcillosas, entiéndase calizas, dolomitas, margas y rocas relacionadas se realiza a pie de pozo, sólo mediante la observación de las características que tiene su reacción con ácido clorhídrico. Este método, de gran sentido

práctico, es sin embargo cualitativo, y en gran medida depende de las consideraciones personales y experiencia del especialista que las ejecuta. Sin embargo, es posible realizar una determinación mucho más precisa si se utilizan los datos de arcilla libre, complementándolos con los análisis de carbonatosidad que se realizan rutinariamente a pie de pozo. Estos análisis se ejecutan mediante el uso de autocalcímetros,

que son capaces de determinar con precisión aceptable no sólo el porcentaje de calcita presente en una muestra, sino también la cantidad de dolomita.

En la tabla 2 se muestra una tabla para la clasificación y nomenclatura de las rocas carbonatado-arcillosas, es decir, aquellas que son el resultado de la mezcla de calcita y minerales arcillosos.

Tabla 2 - Clasificación y nomenclatura de las rocas carbonatado-arcillosas (Segura, 1999).

CALCITA (%)	100-95	95-75	75-65	65-35	35-25	25-5	5-0
	CALIZA	CALIZA MARGOSA	MARGA CALCÁREA	MARGA	MARGA ARCILLOSA	CLAYSTONE MARGOSO	CLAYSTONE
ARCILLA (%)	0-5	5-25	25-35	35-65	65-75	75-95	95-100

Del mismo modo, se puede realizar una buena determinación de las rocas pertenecientes a la

serie dolomita-arcillosa como se describe en la tabla 3.

Tabla 3 - Clasificación y nomenclatura de las rocas de la serie dolomita-arcilla.

DOLOMITA (%)	100-95	95-75	75-35	35-25	25-5	5-0
	DOLOMITA	DOLOMITA MARGOSA	MARGA DOLOMÍTICA	MARGA DOLOMÍTICA ARCILLOSA	CLAYSTONE DOLOMÍTICO MARGOSO	CLAYSTONE
ARCILLA (%)	0-5	5-25	25-65	65-75	75-95	95-100

Finalmente, sólo considerando los resultados de los análisis de calcimetría, pueden clasificarse

con precisión las rocas de la serie calcita-dolomita (Tabla 4).

Tabla 4 - Clasificación y nomenclatura de las rocas de la serie calcita-dolomita.

DOLOMITA (%)	>90	50-90	50-10	<10
	DOLOMITA	DOLOMITA CALCÁREA	CALIZA DOLOMÍTICA	CALIZA
CALCITA (%)	<10	10-50	50-90	>90

Para completar de manera integral la nomenclatura de cada uno de los grupos de rocas clásticas, se tendrá en cuenta la composición de sus fragmentos, que se ha expresado en la descripción. Ya sea en el grupo de las psefitas

y psamitas, como en las pelitas, se completará el nombre de la roca con el apelativo correspondiente a su composición, por ejemplo, cuarcífera, feldespática, polimíctica, calcárea, etcétera.

RESULTADOS

Para ilustrar los resultados de la aplicación de esta metodología, se han seleccionado algunos intervalos de dos pozos. En ambos casos se corresponden con pozos reales, en los que se han cambiado sus nombres por motivos de confidencialidad. El corte del pozo Alpha 1 está integrado por secuencias terrígenas turbidíticas, mientras que en el pozo Alpha 2 se desarrolla la sedimentación de depósitos carbonatados, la cual fue interrumpida en varias ocasiones por flujos

terrígenos turbidíticos.

En la tabla 5 se muestra un resumen de los datos obtenidos durante la perforación del Pozo Alpha 1, donde se expone la interpretación que se hizo de las muestras de *cuttings* en la locación, lo que contrasta con los resultados que se obtuvieron al aplicar esta metodología. Se pueden expresar estos resultados de manera gráfica, como se muestra en los ejemplos de las figuras siguientes (Figuras 10 y 11).

Tabla 5 - Resumen de datos y resultados de la interpretación. Pozo Alpha 1

#	Tope	Base	Espesor	Arcilla %	Grava %	Arena %	Limo %	Composición	Descripción previa	Litología interpretada
1	320	337	17	51	0	26	23	Calcárea	Arenisca calcárea y limolita	Claystone areno-limoso calcáreo
2	337	391	54	6	0	0	0	Serpentinita (bloque)	Bloque de serpentinita	
3	391	550	159	50	0	10	40	Polimíctica	Limolita	Claystone limoso polimíctico
4	550	600	50	39	0	61	0	Polimíctica	Arenisca polimíctica	Grauvaca polimíctica
5	600	609	9	50	0	25	25	Calcárea	Claystone	Claystone areno-limoso calcáreo
6	609	717	108	6	0	19	75	Polimíctica	Limolita y arenisca polimíctica	Limolita arenosa polimíctica
7	717	860	143	50	40	10	0	Pedernálica	Conglomerado pedernálico	Ortoconglomerado pedernálico
8	860	882	22	50	20	30	0	Polimíctica	Arenisca-conglomerado polimíctico	Grauvaca gravosa polimíctica
9	882	928	46	50	10	40	0	Polimíctica	Arenisca polimíctica	Grauvaca polimíctica
10	928	968	40	48	20	32	0	Polimíctica	Conglomerado polimíctico	Grauvaca gravosa polimíctica
11	968	993	25	49	18	33	0	Polimíctica	Conglomerado polimíctico	Grauvaca gravosa polimíctica
12	993	1050	57	51	8	41	0	Polimíctica	Arenisca polimíctica	Grauvaca polimíctica
13	1050	1145	95	52	25	23	0	Polimíctica	Conglomerado polimíctico	Grauvaca gravosa polimíctica

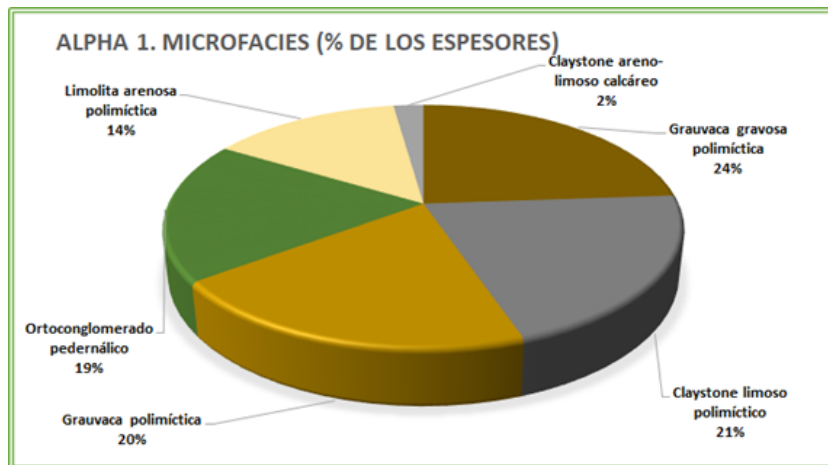


Figura 10 - Expresión gráfica del análisis microfacial de las secuencias turbidíticas del pozo Alpha 1.

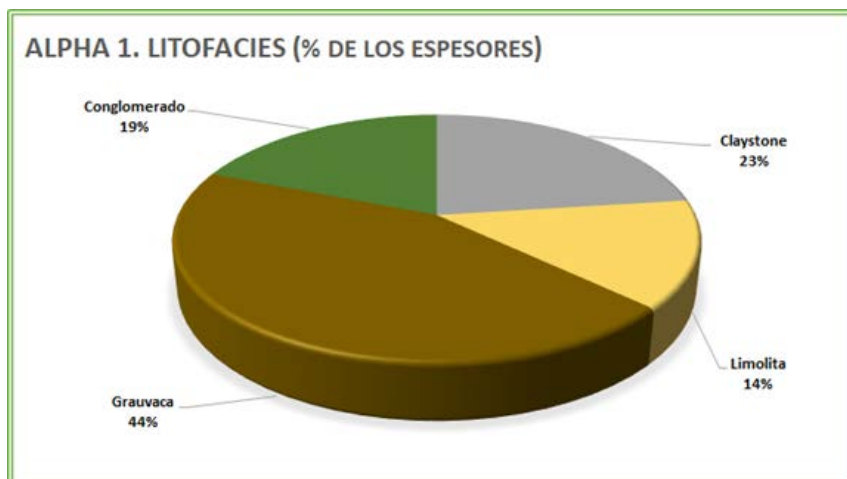


Figura 11 - Representación gráfica de las litofácies de las secuencias turbidíticas del pozo Alpha 1.

Estos resultados también pueden mostrarse desde el punto de vista más general, expresando las litofacies de estas secuencias, como se muestra en la figura 11.

En la tabla 6 se han expresado los resultados de la aplicación de esta metodología en tales secuencias. Con tal finalidad a las ya tradicionales columnas de Arcilla, Grava, Arena y Limo, se añadieron nuevas columnas para

Dolomita y Calcita. Para una fácil interpretación, se sombrearon de colores diferentes las microfacies carbonatadas (celeste) de las terrígenas (pardo claro).

En la figura 12, por su parte, se ha representado el comportamiento de los espesores de cada una de las microfacies que conforman las secuencias carbonatadas y turbidíticas del pozo Alpha 2.

Tabla 6 - Resumen de datos y resultados de la interpretación. Pozo Alpha 2

#	Tope	Base	Esp.	Arc %	Grava %	Arena %	Limo %	Dol %	Calc %	Composición	Descripción previa	Litología interpretada
1	1236	1248	12	11	0	0	0	89	0	Arcillosa	Dolomita	Dolomita margosa
2	1248	1272	24	37	63	0	0	0	0	Polimíctica	Conglomerado	Ortoconglomerado polimíctico
3	1272	1294	22	10	0	0	0	80	10	Arcillosa	Dolomita	Dolomita calcárea margosa
4	1294	1298	4	51	0	0	49	0	0		Claystone	Limolita arcillosa
5	1298	1310	12	10	0	5	0	0	85	Arcillosa	Marga	Caliza margosa arenosa
6	1310	1324	14	29	0	0	0	56	15		Dolomita	Marga dolomítica
7	1324	1339	15	18	0	0	0	82	0		Dolomita	Dolomita margosa
8	1339	1353	14	43	0	57	0	0	0	Cuarcífera	Arenisca	Grauvaca cuarcífera
9	1353	1354	1	87	0	0	0	0	13	Arcillosa	Claystone	Claystone margoso
10	1355	1432	77	18	0	0	0	82	0		Dolomita	Dolomita margosa
11	1432	1438	6	45	0	0	55	0	0	Arcillosa	Limolita	Limolita arcillosa
12	1438	1493	55	15	0	0	0	70	15		Dolomita	Dolomita calcárea margosa
13	1493	1503	9	41	0	0	59	0	0		Limolita	Limolita arcillosa
14	1503	1518	15	17	0	0	0	73	10		Dolomita	Dolomita calcárea margosa
15	1518	1542	24	46	0	0	54	0	0	Calcárea	Claystone	Limolita arcillosa
16	1542	1639	97	65	35	0	0	0	0		Conglomerado	Ortoconglomerado calcáreo

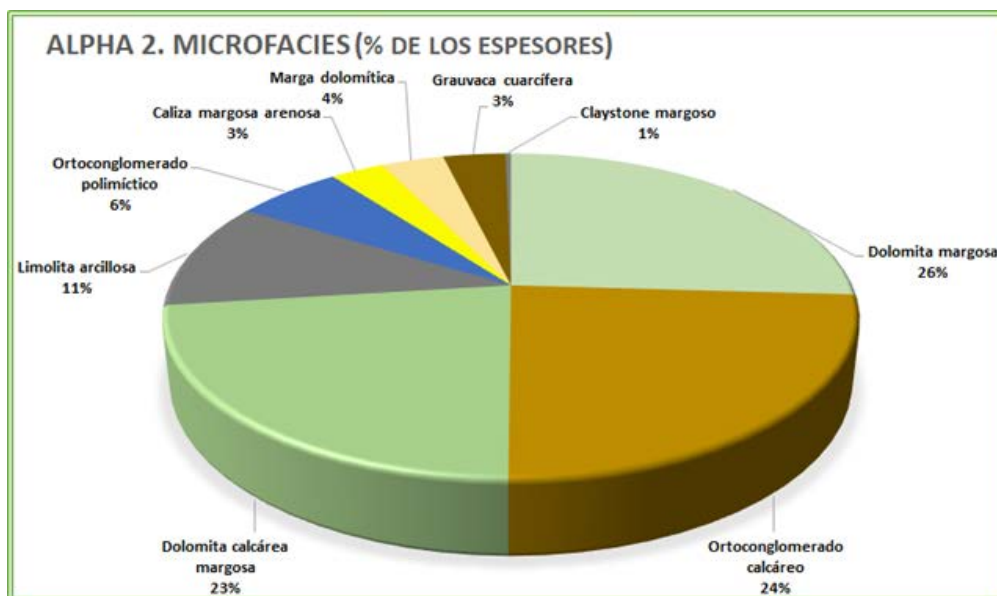


Figura 12 - Gráfico que expresa las proporciones de los espesores de las microfacies del pozo Alpha 2.

DISCUSIÓN Y CONSIDERACIONES FINALES

Puede apreciarse que después de aplicada la metodología, los resultados han ganado marcadamente en cuanto a la precisión de las clasificaciones. Con estos datos es posible realizar

análisis faciales mucho más exactos.

En la figura 13a se muestra una columna litológica con las microfacies que se determinaron en las secuencias turbidíticas del pozo Alpha 1. Este

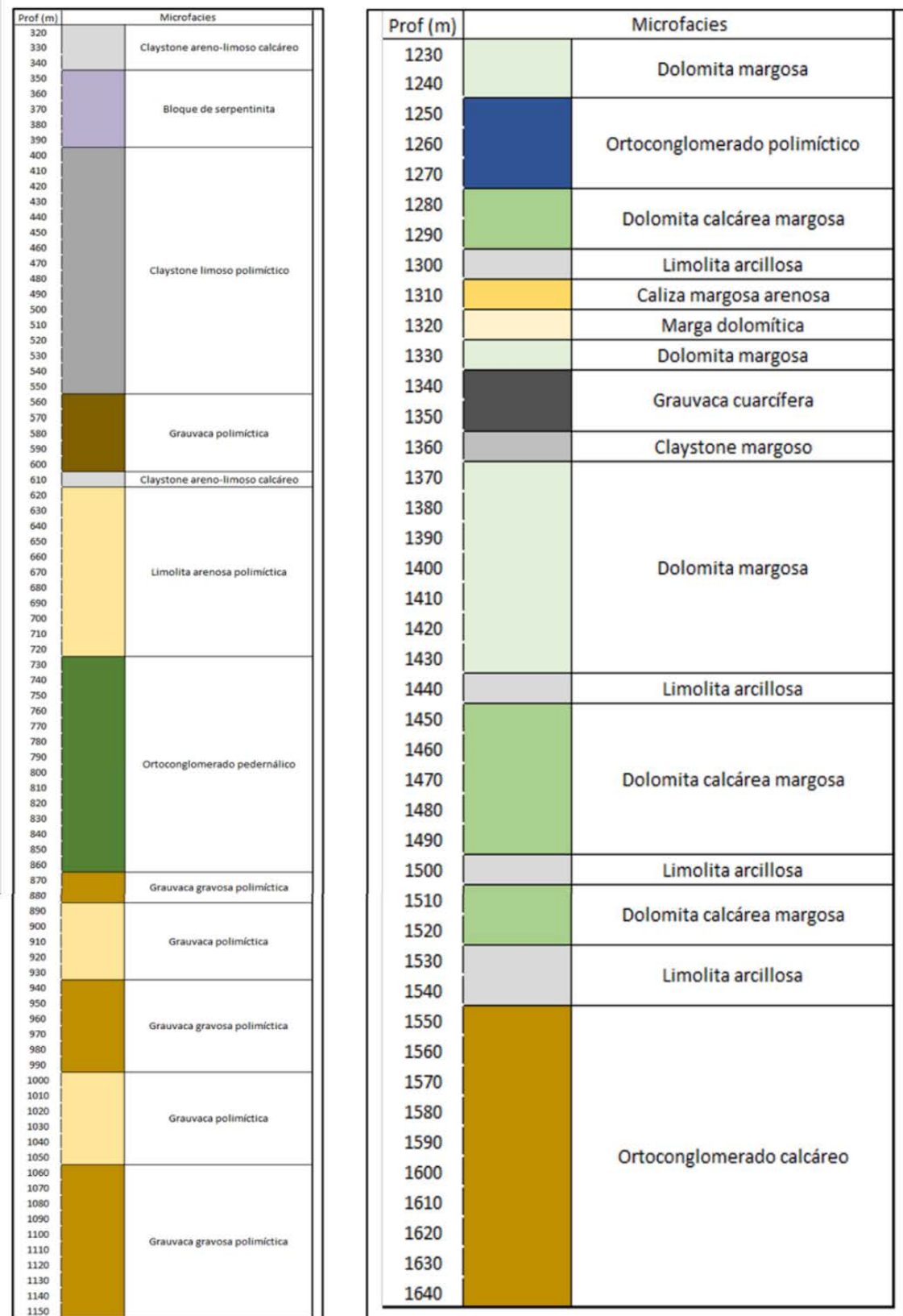


Figura 13 – a) Coluna con las microfacies de las secuencias turbidíticas del Pozo Alpha 1. b) Columna con las microfacies de las intercalaciones de las secuencias turbidíticas y carbonatadas del Pozo Alpha 2.

gráfico es de gran utilidad para una mejor comprensión de la sedimentogénesis de estas secuencias.

A diferencia del pozo mostrado en los ejemplos anteriores, el Alpha 2 muestra el desarrollo de secuencias carbonatadas formadas por diversas

facies de calizas, margas y dolomitas, que se intercalan con intervalos terrígenos turbidíticos.

Semejante conducta puede ser claramente interpretada como los procesos que ocurrieron en una cuenca marina de profundidad media a profunda, en la cual se sedimentaban carbonatos,

en parte arcillosos. Esta sedimentación de tipo de cuenca era periódicamente interrumpida por sedimentos terrígenos turbidíticos provenientes del talud continental.

En la figura 13b se ha representado la conducta de las intercalaciones de microfacies carbonatadas y carbonatado-arcillosas, con secuencias terrígenas turbidíticas.

A partir del análisis anterior:

Se demuestra que la aplicación de la nueva metodología para la interpretación de las secuencias turbidíticas con la utilización combinada de herramientas de sedimentología y registros geofísicos permite una clasificación mucho más detallada de tales litotipos, al incluir en la interpretación la existencia de una matriz arcillosa, ausente en las muestras de *cuttings* debido a los procesos de perforación y lavado de las muestras.

El hecho de contar con el contenido de arcilla libre, facilita la clasificación de las rocas carbonatadas y carbonatado-arcillosas con elevada precisión.

Con los datos obtenidos al aplicar la presente metodología, es factible realizar detallados análisis microfaciales.

La existencia de un complejo de registros geofísicos en los pozos escogidos, permitió calcular la arcillosidad para cada una de las microfacies, de modo que fue posible utilizar estos valores para suplir la ausencia de matriz arcillosa en las muestras.

Al complementar el porcentaje de arcilla obtenido por registros con los porcentajes de cada uno de los granos observados en las muestras, se hace posible realizar una buena aproximación a una clasificación correcta de estos sedimentos.

La presentación de los resultados puede expresarse mediante gráficos y columnas de tipos diversos, así como por la confección de mapas microfaciales.

La aplicación en los resultados de los análisis microfaciales, son de gran utilidad para la exploración de yacimientos de petróleo y gas, permitiendo una elevada comprensión de las características de reservorios y sellos.

REFERENCIAS

- BECK, C.K. & CROOK, K. **Classification of Sandstones**. The Editors of Encyclopaedia Britannica. 2024.
- BOUMA, A.H. **Sedimentology of some Flysch deposits; A graphic approach to facies interpretation**, Elsevier, 1962, 168 p.
- CRAIN, E.R. **The Log Analysis Handbook**, v. 1 «Quantitative Methods», PennWell Books, Tulsa, Oklahoma. 684 p., 1986.
- CROOK, A. W., 1960, Classification of arenites: *Am. Jour. Sci.*, v. 258, p. 419-428.
- DAPPLES, E. C., KRUMREIN, W. C., AND SLOSS, L. L. Petrographic and lithologic attributes of sandstones: *Jour. Geology*, v. 61, p. 291-316. 1953.
- DOTT, R.H. Wacke, graywacke and matrix; what approach to immature sandstone classification? *Journal of Sedimentary Research* 34 (3): 625-632. 1964.
- FOLK, R.L. **Petrology of Sedimentary Rocks**. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas. 180 p., 2002.
- GILBERT, C. M. Sedimentary rocks. In: WILLIAMS, H., TURNER, F. J., AND GILBERT, C. M., *Petrography*: San Francisco, W. H. Freeman and Co., 406 p. 1954.
- HERNÁNDEZ-LEÓN, J.; CASTRO-CASTIÑEIRA, O.; VALDIVIA-TABARES, C.M. Nuevo Enfoque de la Interpretación de las Secuencias Clásticas Sinorogénicas. In: Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana. Cuba. Convención de Ciencias de la Tierra (resumen ampliado). 18 p., 2020.
- MALDONADO, A.; RUIZ-ORTIZ, P.A. Modelos de Sedimentación Turbidítica Antiguos y Modernos. **Cuadernos de Geología Ibérica**, v. 8, p. 499-525, 1982.
- PACKHAM, G. H. Sedimentary structures as an important feature in the classification of sandstones; *Am. Jour. Sci.*, v. 252, p. 466-476. 1954
- PETTIJOHN, F.J. *Sedimentary rocks*. 1st ed. New York. Harper and Brothers. 526 p. 1947.
- PETTIJOHN, F.J. Classification of sandstones. *Journ. of Geol.* V. 62: 360 - 365. 1954.
- PETTIJOHN, F.J. *Sedimentary Rocks*. Second Edition. Harper and Brothers. 718 p. 1957.
- PETTIJOHN, F.J. *Sedimentary Rocks*. Second Edition. Harper Collins Publishers. 526 p. 1983.
- PETTIJOHN, F.J., POTTER, P.E., SIEVER, R. **Sand and Sandstone**. Springer-Verlag. New York-Heidelberg, Berlin, 1973.
- SCHLUMBERGER **Natural Gamma Ray Spectrometry**. Essentials of N.G.S interpretation. Schlumberger Limited, Services Techniques Schlumberger, 69 p., 1982.
- SEGURA, R. Curso de Petrografía y Sedimentología. Inédito. Notas del autor. 1999.
- TERENCE, C.B. & McPHERSON, J.G. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. Blair and Associates. USA. 19 p. 1999.
- UDDEN, J. A. Mechanical composition of clastic sediments. **Geological Society of America Bulletin**, v. 25, n. 1, p. 655-744, 1914.
- WENTWORTH, C.K. **A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments**. University of Chicago Press. 1922.
- ZAVALA, C.; ARCURI, M.; DI MEGLIO, M.; ZORZANO, A. Depósitos de turbiditas intra y extra cuencuales: origen y características distintivas. In: IX CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS. Buenos Aires, 2013. **Actas...** Buenos Aires: Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina

Submetido em 23 de abril de 2024

Aceito para publicação em 12 de agosto de 2024.