Capítulo 3
Rocas sedimentarias

En el Capítulo 1 se mencionaron numerosos factores de carácter geológico y químico implicados durante la perforación, por lo que es importante la descripción de las propiedades de las rocas presentes en las estructuras geológicas que se han reportado [(1)], en estudios de yacimientos de petróleo [(2)], por ejemplo la Tabla 3.1 muestra las principales épocas y formaciones de interés petrolero de los campos del Distrito Ebano-Panuco.

Tabla 3.1 Características de los periodos geológicos

Periodo	Época	Formación	Características
Terciario	Oligoceno	Mesón	Arcillas arenosas, amarillentas
	Paleoceno	Velasco	Lutitas
Cretácico	Superior	Méndez	Lutitas y Margas
		San Felipe	Calizas, en partes margosas
		Agua Nueva	Calizas densas con intercalaciones de Ilita y Pedernal
	Medio	Tamaulipas Superior	Caliza densa, microcristalina, en partes cretosa
	Inferior	Horizonte Otates	Caliza gris obscura a negra, Lutita negra
		Tamaulipas Inferior	Caliza densa, en partes arcillosa, con intercalaciones de Lutita y Pedernal
Jurasico Superior	Kimmeridgiano Divesiano	Huizachal	Su parte superior está constituida por una serie de calizas, gris obscuro, densas, arcillosas, con intercalaciones de Lutita, ocasionalmente se encuentra caliza dolomítica café. En su parte inferior (capas rojas) se encuentran arenisca roja y Lutita roja

Uno de los trabajos más importantes que se llevan a cabo en geología [(3)], si no el más importante, es el estudio de los cortes provenientes de la perforación de pozos, a llevar a cabo el examen de las muestras se debe tener en mente, que los datos obtenidos servirán para resolver muchos problemas tanto particulares del pozo, como locales o regionales y por consiguiente que la información, de ser posible, debe ser verificada.

El estudio de los cortes provenientes de la perforación de pozos petroleros tiene tres aspectos fundamentales:

a) Determinar los contactos entre las diferentes formaciones del subsuelo
b) Interpretar la estratigrafía local para utilizarla en problemas de estructura regional y local, sedimentación y, en su caso acumulación de hidrocarburos.

c) Investigar el carácter económico de los horizontes para poder aplicar en su caso, los métodos de producción adecuados.

Tanto el carácter litológico de una muestra como las relaciones que guardan entre sí diferentes muestras de un mismo pozo se pueden determinar por el estudio adecuado de los diferentes fragmentos cortados por la barrena, a simple vista, con ayuda del lente de mano o bien de un microscopio para litología. [(3)]

Como sabemos las muestras provenientes de las perforaciones son de dos tipos: de canal y de núcleo. Las primeras son recogidas en la superficie mediante el sistema de circulación del lodo, a intervalos que varían según el tipo de pozo, (de exploración o de explotación) y que pueden variar desde un metro (conveniente para pozos de exploración) hasta 10 ó 20 metros (para algunos pozos de exploración en campos conocidos). El intervalo de muestreo está relacionado con la aproximación que se deseé para obtener la información adecuada al objeto de la investigación; por ejemplo el grado de conocimiento de los contactos, las características particulares de los diferentes estratos, etc.

La determinación de un contacto puede requerir que el muestreo se haga a intervalos de un metro o aún menores en los casos de los horizontes productores, pero claro es que no será el caso general. Sin embargo, es recomendable hacerlo para aquéllos pozos de exploración que sirven para investigar la secuencia estratigráfica.

Las muestras de canal provenientes de la perforación con equipo rotatorio no proporcionan información precisa por el grado de contaminación causado por la recirculación del material de la formación. Este factor ocasiona que los contactos de las formaciones, tanto desde el punto de vista litológico, como paleontológico, sean difíciles de precisarse con la debida aproximación, salvo en aquellos casos en que se tengan conocimientos previos de la columna geológica que se está atravesando. Antes de iniciar el estudio de una muestra, debe tenerse la precaución de limpiarla perfectamente, para lo cual es necesario remover tanto los restos del fluido de perforación como el polvo que se hubiere acumulado, a fin de evitar confusión al determinar la litología de la muestra.

La industria petrolera ha invertido esfuerzos y dinero en entender que fenómenos ocurren durante la perforación de un pozo. De esta forma se ha

identificado una variedad de fenómenos que van desde la composición del material rocoso, el tiempo de exposición del material con el fluido, el régimen natural de esfuerzo y presión, el comportamiento mecánico de la roca y el mecanismo térmico. Conocer las propiedades de las rocas que se encuentran durante la perforación de un pozo, es muy importante para que la operación de perforación sea exitosa. A continuación se detallan las propiedades de los tipos de rocas generalmente asociadas a los yacimientos petroleros.

III.1 Rocas sedimentarias

Para fines de clasificación los sedimentos y rocas sedimentarias pueden agruparse de una manera general en dos clases principales:

1. Los constituidos en su mayor parte de materiales detríticos, fragmentados o clásticos, derivados de rocas preexistentes, y
2. Los formados principalmente por sustancias precipitadas, químicamente, y por restos orgánicos de plantas animales, ya sean marinos o terrestres.

Dentro de las rocas clásticas podemos considerar a los conglomerados, arenas y limos y arcillas. Ver Tabla 3.2.

Las rocas sedimentarias se formaron mediante la actividad química o mecánica de los agentes de denudación de las rocas preexistentes, y que han sido depositadas a temperaturas y presiones ordinarias a partir de suspensiones en agua o aire. Partiendo de una masa rocosa, esta se desagrega o fragmenta y las partículas son acarreadas a un lugar de depósito, el cual puede ser el fondo de un lago, el lecho de un río o el fondo del mar, se caracterizan por la estratificación.

La Fig. 3.1 se muestra como las gravas forman conglomerados, las arenas forman areniscas, los limos forman limolitas y las arcillas forman lutitas.

III.2 Estratificación

Es una características con las que se depositan en forma de estratos (se observa en núcleos y muestras de mano) las rocas sedimentarias y debe ser medible, es decir, mayor de 1 cm. de espesor, su clasificación se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2 Clasificación general de rocas sedimentarias

Clasificación	Características	
Rocas sedimentarias	Clásticas	
	No clásticas	
	Químicas	
	Orgánicas	
Aloquimicos (agregados carbonatados)	Intraclastos.- Fragmentos contemporáneos dentro de la formación	
	Oolitas.- Agregados de estructura concéntrica y radial de calcita que se forma a partir de un núcleo detrítico de 2mm de diámetro, cuando son mayores se denominan pisolitas.	
	Fósiles.- Material esquelético en general	
	Pelets.- Agregados carbonatados de textura criptocristalina de froma esférica o elíptica sin estructura interna	
	Oncolitos.- Agregados de algas de forma arredondea y sin estructura radial	
Sedimentos clásticos	Cantos	Conglomerado Brecha
	Gravas	Conglomerados finos
	Arena	Arenisca
	Limo	Limolitas
	Arcilla	Lutitas
Sedimentos inorgánicos	Calizas Aloctonas	Calcilutita
	Calizas Detríticas	Calcarenita
	Calizas Transportadas	Calcirrudita
	Dolomias	
Evaporitas	Halita (Sal)	
	Yeso	
	Anhidrita	
Sedimentos orgánicos	Calizas Autóctonas Bioquímicas	
	Formadas “in situ”	Caliza arrecifal
Sedimentos Mixtos	Combinación de material de origen químico	

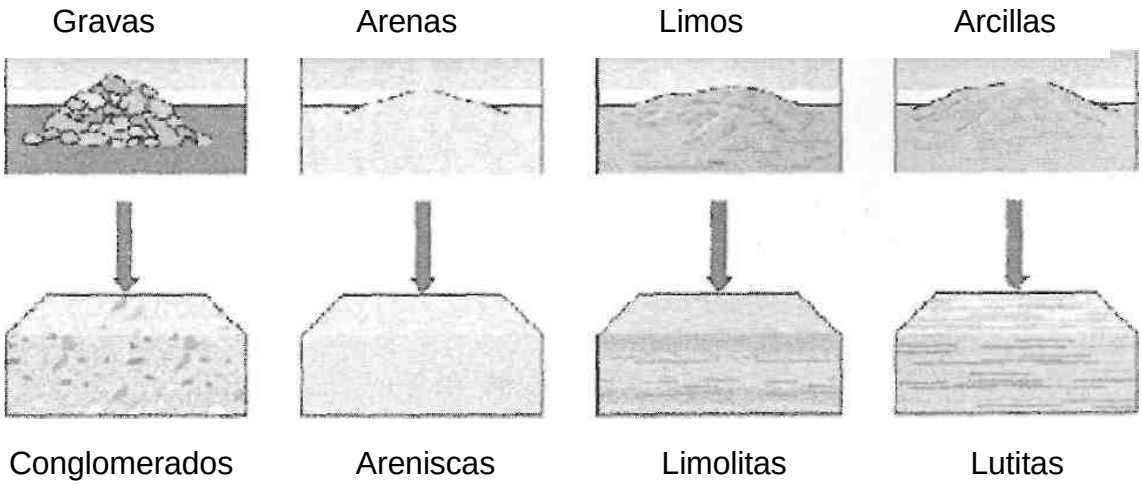


Fig. 3.1 Ejemplo de la formación de rocas con sedimentos

Los registros estratigráficos de los cuerpos de rocas se pueden estudiar con base en sus características físicas, químicas, petrofísicas, paleontológicas y

geométricas, en unidades estratigráficas las cuales pueden contener petróleo en caso de los plays (El play es un modelo inicial que combina un cierto numero de factores geológicos con el resultado de la existencia de la acumulación de hidrocarburos en un determinado nivel estratigráfico de la cuenca [4]).

Tabla 3.3 Tipos de estratificación

Estratificación	Características
Delgada	1 a 30 cm
Media	30 a 80 cm
Gruesa	80 cm a 1.6 m
Masiva	mayor de 1.6 m
Graduada	Es la estratificación que se forma por corrientes de agua de mayor a menor intensidad dando como resultado clasificación de los granos de mayor a menor tamaño, como se muestra en la Fig. 3.2. Fig. 3.2 Arenisca[5]
Cruzada	Es la estratificación inclinada con respecto a un estrato más grande, dentro del cual ocurre, como se muestra en la Fig. 3.3. Dicha estratificación representa el trabajo de un enérgico movimiento de flujo de agua o de aire, como en los ríos, el viento o las olas sobre la costa. La estratificación cruzada en las rocas sedimentarias implica corrientes antiguas Fig. 3.3 Arenisca de grano fino a medio, subangular a subredondeado, con intercalaciones de lentes de lutitas y estratificación cruzada.[5]

Las unidades lito-estratigráficas tienen un tipo de roca específico y pueden tener diferentes geometrías que también pueden ser determinadas por información obtenida del subsuelo y por métodos geológicos y geofísicos; por su parte, las unidades litodémicas son rocas que se componen de intrusiones o deformaciones.

Las unidades bioestratigráficas se componen y caracterizan por su contenido fósil y son muy importantes para realizar correlaciones locales o regionales porque proporcionan los medios para definir y reconocer unidades de roca basadas en el contenido fósil y en la cantidad y calidad de la materia orgánica.

La correlación estratigráfica sirve para establecer la correspondencia entre partes geográficamente separadas de una unidad geológica, se utiliza para comparar dos o más secciones estratigráficas, a partir de alguna propiedad definida [6].

Para las rocas carbonatadas, también se usa la clasificación con base en la textura con la que se depositan los sedimentos (clasificación de R. Dunham), por lo que se consideran útiles tres características de textura:

1. Presencia o ausencia de lodo calcáreo, el cual diferencia los lodos calcáreos del grainstone.
2. Abundancia de granos lo que permite la subdivisión en mudstone, wackestone y packstone
3. La presencia de señales de la liga o trabamiento durante la depositación, lo que caracteriza al bounstone

R. Dunham considera como carbonatos cristalinos, aquellas rocas que retienen demasiado o poco de su textura de deposito para ser clasificados por efectos de recristalización y dolomitización, quedando en algunos casos, residuos de los granos, por medio de los cuales puede clasificarse la roca, prescindiendo de la textura de deposito, por ejemplo: dolomía cristalina de oolitas. Otra clasificación son la de Folk, y la de Fuchtbauer (Pettijohn (1957) o Chilingar (1960).

Tabla 3.4 Comparación de algunos sistemas de clasificación de las rocas carbonatadas.

AUTOR	APLICACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Dunham (1962)	Muestra mano y sección delgada	Rápida identificación en el campo	
Folk (1959-1962)	Sección delgada	Subdivisión de textura	Algunas subdivisiones son artificiales
Fuchtbauer (1970)	Campo, muestra mano y sección delgada	Rápida clasificación	Mezcla descriptiva y conocimiento genético
Leighton and Pendexter (1962)	Campo, muestra mano	Rápida designación en la roca	Mezcla descriptiva y criterio genético; algunos valores de % son rigurosos
Monty (1963)	Sección delgada		Sistema de nomenclatura y términos complicados
Todd (1966)	Sección delgada	Intento de una clasificación exhaustiva	También involucra análisis de facies
Plumley et. al (1962)	muestra mano y sección delgada	Rápida clasificación de tipo genético	Algunos conocimientos son hasta cierto punto cuestionables

Aunque existen muchos sistemas de clasificación de las rocas carbonatadas, los esquemas de Dunham (1962) y Folk (1962) son los más usados; el primero tiene como ventaja la identificación y clasificación de las rocas directamente en el campo (Tabla 3.5), y la segunda proporciona una subdivisión de las rocas de acuerdo a su textura (Tabla 3.6)

Tabla 3.5- Sistema de clasificación de rocas calizas ideado por Dunham (1962)

<table>
<tr><td colspan="5">**La textura original del depósito es reconocible**</td><td>**La textura no se reconoce**</td></tr>
<tr><td colspan="4">**Los componentes originales no están soldados.**</td><td>**Component es soldados**</td><td rowspan="6">**Carbonatos cristalinos**</td></tr>
<tr><td colspan="3">**Contiene lodo**</td><td>**Sin lodo**</td><td rowspan="5">**Boundstone**</td></tr>
<tr><td colspan="2">**Sostenida por lodo**</td><td colspan="2">**Sostenida por granos**</td></tr>
<tr><td colspan="2">**% Granos vs Matriz**</td><td>**Packstone**</td><td>**Grainstone**</td></tr>
<tr><td>**<10% Granos**</td><td>**>10% Granos**</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>**Mudstone**</td><td>**Wackestone**</td></tr>
</table>

Tabla 3.6. Sistema de clasificación de rocas calizas propuesto por Folk (1962).

<table>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">Composición volumetrica de aloquímicos</td><td colspan="2">> 10% de Aloquímicos</td><td colspan="3">< 10% de Aloquímicos</td><td rowspan="2">Rocas bioher-males.</td></tr>
<tr><td>Calcita espática >Matriz micritica</td><td>Matriz micritica> Calcita espática</td><td colspan="2">1-10% Aloquímicos</td><td><1% Aloquí-micos</td></tr>
<tr><td colspan="3">> 25% Intraclastos</td><td>Intrasparrudita Intraesparita</td><td>Intramicrudita Intramicrita</td><td rowspan="5">Abundates Aloquímicos</td><td>Intraclastos: Micrita con intraclastos</td><td rowspan="5">Micrita, o parches de espatita presenta Dismi-crita</td><td rowspan="5">Organis-mos en posición de crecimi-ento

Biolitita</td></tr>
<tr><td rowspan="4">< 25% Intraclastos</td><td colspan="2">> 25% Ooides</td><td>Oosparrudita Oosparita</td><td>Oomicrudita Oomocrita</td><td>Ooides: Micrita con oolitas</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Volumen fósiles/ peloides</td><td>< 25% Ooides</td><td>> 3.1</td><td>Bioesparrudita Biosparita</td><td>Biomicrudita Biomicrita</td><td rowspan="2">Fósiles: Micrita fosilífera</td></tr>
<tr><td>3.1 a 1.3</td><td>Biopelsparrudita Biopelsparita</td><td>Biopelmicrudita Biopelmicrita</td></tr>
<tr><td>< 1.3</td><td>Pelsparita</td><td>Pelmicrita</td><td>Peloides: Micrita peletifera</td></tr>
</table>

En la Fig. 3.4 se presenta la clasificación de las rocas carbonatadas en función de la textura según Dunham [(7)], 1962, y de acuerdo a los componentes petrofísicos, según Folk 1962 [(7)], en la Fig. 3.5 y en la Tabla 2.4 los diferentes tipos de clasificaciones.

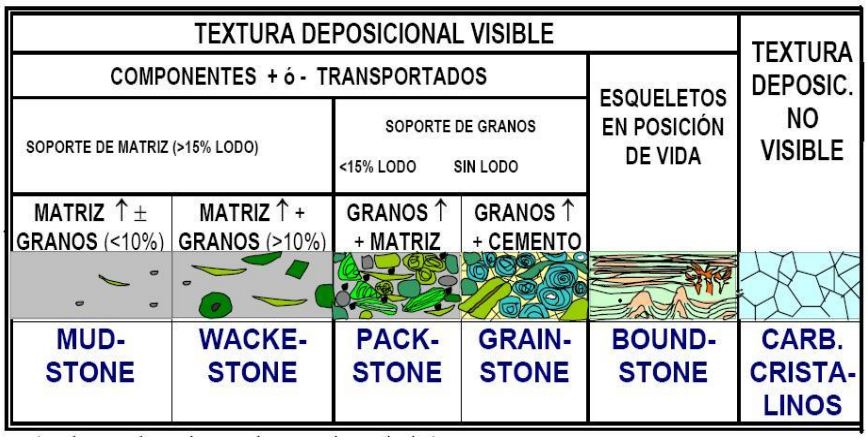


Fig. 3.4 Clasificación de las calizas en función de la textutra, (Dunham).
(lodo = lodo carbonatado = matriz = micrita), (cemento carbonatado= esparita)

De los componentes petrofísicos según Folk, 1962, Fig. 3.5.

Fig. 3.5 Clasificación de las calizas en función de los componentes petrofísicos

La matriz se trata del lodo calcáreo que en ocasiones constituye el total de la roca o que ocupa los espacios entre los granos, la micrita es de color más oscuro que la calcita espática (generalmente de color blanco), su tamaño es menor a 20 micrómetros.

El cemento es una calcita espática que rellena los espacios de los poros de las rocas, cuando el fango calcáreo ha sido lavado por la acción de corrientes, su tamaño es mayor a 20 micras.

Tabla 3.7 Equivalencia en las diferentes denominaciones de las rocas carbonatadas

R. Dunham	Robert Folk	Pettijohn
Mudstone	Micrita	Calcilutita
Wackestone	Micrita	Calcarenita
Packstone	Micrita	Calcarenita
Grainstone	Espatita	Calcarenita
Bounstone	Biolita	Bioherma, Biostroma

Según el tamaño de grano de Udden-Wentworth, modificada de Adams y otros (1984), en la Tabla 3.8 aparece la escala de tamaño de grano.

Tabla 3.8 Clasificación de sedimentos por el tamaño de grano

Límites de Clase [mm]	Clases de tamaño		Término para roca
256	Gravas	Peñascos	Conglomerado
16		Mataténas	Brecha
4		Guijarros	Rudita
2		Gránulos	Rocas rudáceas
1	Arenas	Arenas muy gruesas	
0.5		Arenas gruesas	Arenisca
0.25		Arenas medianas	Arenita
0.125		Arenas finas	Rocas arenáceas
0.0625		Arenas muy finas	
0.0312	Limos	Limo grueso	Argilita
0.0156		Limo medio	Limolita Rocas argiláceas
0.0078		Limo fino	Lodolita
0.0039		Limo muy fino	Rocas Lodosas
		Arcilla	Lutita

Los aloquímicos en las rocas carbonatadas son agregados carbonatados y son los siguientes:

Los intraclastos son fragmentos contemporáneos, retrabajados dentro de la misma formación, en ocasiones erosionados antes de la consolidación de los sedimentos.

Las oolitas son agregados de estructura concéntrica y radial originalmente de aragonita y remplazada por calcita, que se forman a partir de un núcleo detrítico con un tirante de agua de ± 5 m, de forma esférica y un diámetro de 0.5 a 2 mm; cuando rebasan el tamaño de 2 mm se denomina pisolitas. La Fig. 3.6 muestra una caliza oolitica.

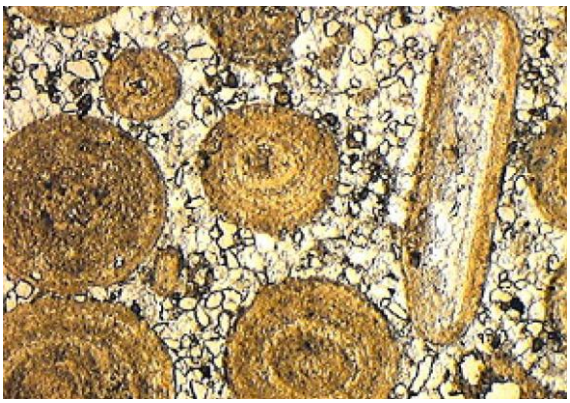


Fig. 3.6 Caliza oolitica

Los fósiles son restos de organismos vegetales o animales que vivieron en el pasado y que se han conservado, la fosilización es una serie de trasformaciones químicas que reemplazan los compuestos orgánicos; cuando la materia orgánica se conserva (fósil geoquímico), este se convierte en hidrocarburo.

Los pellets son agregados carbonatados de textura criptocristalina, de forma esférica o elíptica, sin estructura interna, cuyas dimensiones son de 0.5 a 0.75 mm; cuando rebasan el tamaño de 0.75 mm se denominan peletoides.

Los oncolitos son agregados de algas de forma redondeada y sin estructura concéntrica y radial como las oolitas, pero que en ocasiones si se observa la estructura de superposición del envolvente de algas, su tamaño es variable, desde unos cuantos mm a algunos cm.

A continuación hay una descripción de las rocas carbonatadas según R. Folk.

El mudstone es una roca carbonatada constituida por lodo calcáreo que contiene menos del 10% de granos diseminados mayores de 2 mm (caliza arcillosa, micrita), mudstone es sinónimo de calcilutita.

Fig. 3.7 a) Mudstone bentonitico y b) Mudstone arcilloso

La Fig. 3.7 a) es un mudstone bentonitico del pozo cactus 1073 tomado a una profundidad de 3505 a 3507 m de profundidad y b) un mudstone arcilloso del pozo Tizón 212 tomado a una profundidad de 6380 a 6390 m de profundidad.

El wackestone es una roca carbonatada con soporte de lodo calcáreo que contiene más de 10% de granos diseminados, mezcla de grano y lodo (caliza, calcarenita, caliza fosilifera y cretosa), wackestone es sinónimo de caliza calcarenítica.

El packstone es una roca carbonatada con lodo calcáreo y soporte de granos en contacto (calcarenita biogena, calcirrudita) tiene el 60% de granos unidos, packstone es sinónimo de calcarenita, calcirrudita.

El grainstone esta libre de lodo calcáreo con soporte de grano y ocupados los espacio de los granos por calcita espatica y calcarenita espatica (100% de granos unidos), grainstone es sinónimo de calcarenita espática, calcirrudita espática.

El bounstone es una roca carbonatada con señales de haber sido ligada durante su depósito. Fósiles en etapa de crecimiento (carbonato arrecifal, coquina, microcoquina biolitica). Bounstone es sinónimo de carbonato arrecifal, biolitita, coquina.

III.3 Estructuras de algunas arcillas

Las rocas sedimentarias que tienen mayor importancia en el ámbito petrolero son:

- Aquellas que contienen minerales arcillosos como mayoritarios o como matriz cementante: arenisca arcillosa, caliza arcillosa, lutitas calcáreas, o lutitas.
- Arcillas: Montmorillonita (esmectita), ilita, caolinita, clorita, intraclastos.

Este tipo de minerales, se encuentran asociados con la inestabilidad de las estructuras durante la perforación del pozo, son las estructuras más reactivas y se presentan problemas como: fracturas y derrumbes, contaminación de los fluidos, hinchamiento. Por lo que las propiedades que se detallan a continuación serán de suma importancia para este tipo de rocas, es indispensable mencionar que el campo de las rocas sedimentarias es muy amplio y que su rango de variación de las propiedades físicas es el más amplio de las tres (ígneas, sedimentarias y metamórficas) clases principales rocas.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados, en la mineralogía se le emplea para describir a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades fisicoquímicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 mm), en sedimentología, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 mm.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos $(SiO)_4^{4-}$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(Si_2O_5)^{2-}$, que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+}.

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos Al^{3+} o Mg^{2+}, pueden estar sustituidos por Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(OH)^-$ de la capa brucitica o gibsitica, de forma que, en este plano, quede un $(OH)^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los $(OH)^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros (Fig. 3.8).

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan **bilaminares**, **1:1**, o **T:O**; o bien por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose **trilaminares**, **2:1** o **T:O:T**. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina **láminas.**

Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina **trioctaédrica** (Mg^{2+} dominante en la capa octaédrica). Si solo están ocupadas dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, se denomina **dioctaédrica** (el Al^{3+} es el catión octaédrico dominante)

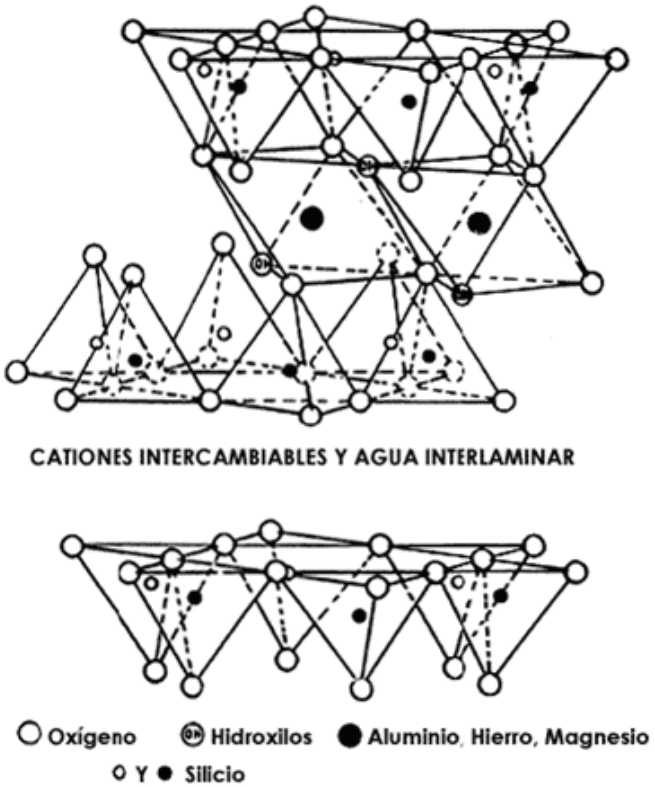


Fig. 3.8 Lámina T-O-T, o, también conocida como la estructura de sándwich. Esta lámina tiene pues dos hojas T y una hoja O, o sea la lámina es del tipo 2:1.

En algunos filosilicatos (esmectitas, vermiculitas, micas...) las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga. El balance de carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar, o espacio existente entre dos láminas consecutivas, de cationes (como por ejemplo en el grupo de las micas), cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmectitas) o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente, similares a las capas octaédricas, como sucede en las cloritas. A éstas últimas también se las denomina **T:O:T:O** o **2:1:1**. La unidad formada por una lámina más la interlámina es la unidad estructural. Los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos (Mg y Ca).

Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por ese motivo los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas.

También pertenecen a este grupo de minerales la sepiolita y la paligorskita, a pesar de presentar diferencias estructurales con el resto de los filosilicatos. Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas de tipo mica. A diferencia del resto de los filosilicatos, que son laminares, éstos tienen hábito fibroso (Fig. 3.9),

ya que la capa basal de oxígenos es continua, pero los oxígenos apicales sufren una inversión periódica cada 8 posiciones octaédricas (sepiolita) o cada 5 posiciones (paligorskita). Esta inversión da lugar a la interrupción de la capa octaédrica que es discontinua.

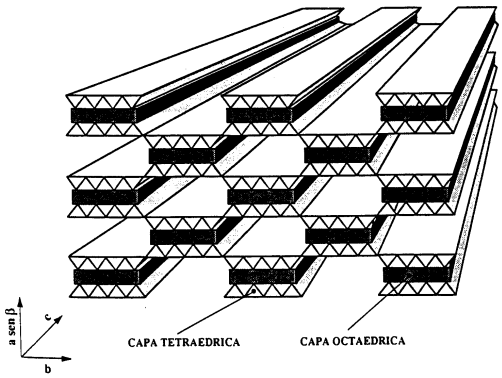


Fig.3.9 Sepiolita y paligorskita, formadas por láminas discontinuas de tipo mica

Los filosilicatos se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos (Tabla 3.9). Como puede verse pertenecen a los filosilicatos grupos de minerales tan importantes como las micas y las arcillas.

Presentaciones esquemáticas de tres minerales arcillosos, montmorillonita, caolinita e ilita, se presentan en la Fig. 3.10. Todas estas arcillas pueden finamente ser dispersadas y exhibir propiedades plásticas cuando se mojan con agua.

Tabla 3.9 Clasificación de las arcillas

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		Carga
Bilaminares T:O (1:1)		**Caolinita**		Antigorita	**X = 0**
	Canditas	Nacritas	**Serpentina**	Crisotilo	
		Dickita		Lizardita	
		Halloisita		Bertierina	
Intralaminares T:O:T (2:1)	Pirofilita		Talco		**X = 0**
		Montmorillonita		Saponita	**X = 0.2-0.6**
	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita	
		Nontronita			
	Vermiculitas		Vermiculitas		**X = 0.6 – 0.9**
	Illitas				**X = 0.9**
		Moscovita		Biotita	**X = 1**
	MICAS	Paragonita	MICAS	Flogopita	
				Lepidolita	
T:O:T:O (2:1:1)	**Cloritas**				
Fibrosos	**Paligorskita**		**Sepiolita**		

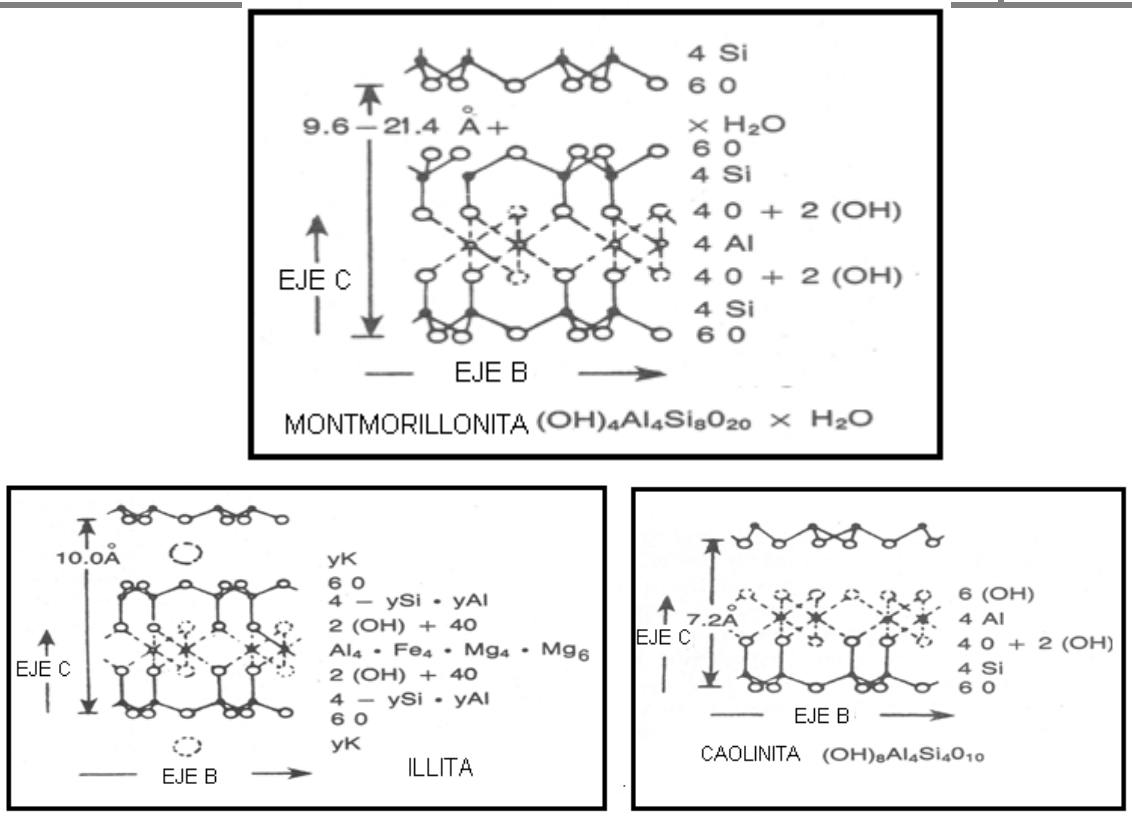


Fig. 3.10 Presentaciones esquemáticas de los tres minerales arcillosos.

En seguida se muestran las representaciones esquemáticas de la estructura de minerales arcillosos, montmorillonita, caolinita e illita, Fig. 3.11.

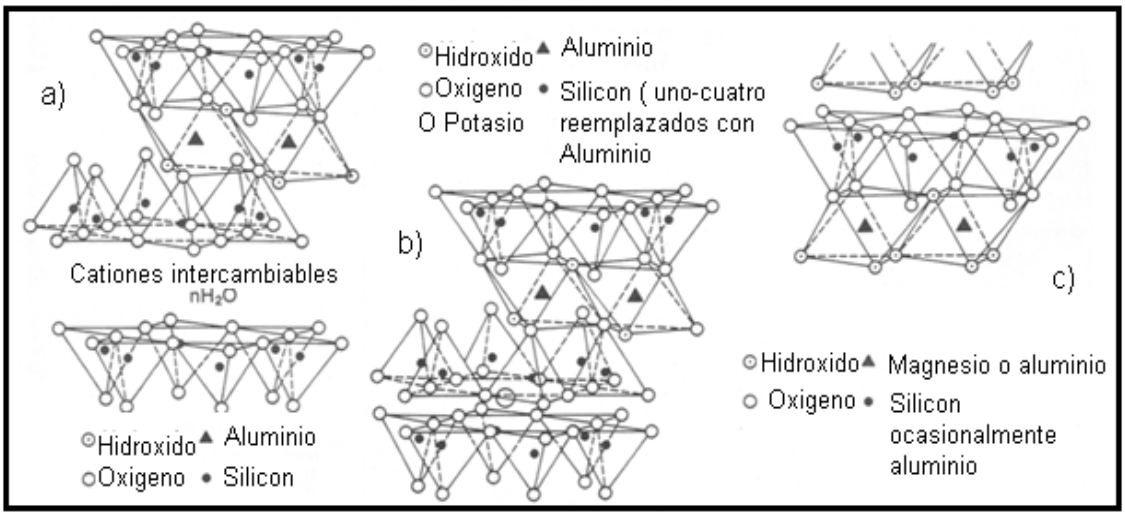


Fig. 3.11 Representaciones esquemáticas de las estructuras enrejadas cristalinas de minerales arcillosos, incluyendo a) Montmorillonita, b) Illita y c) Caolinita

De estos tipos de arcillas, la montmorillonita (bentonita) tiene características inusuales y singulares, particularmente cambios en el espacio de cristal enrejado a lo largo del eje C, resultado de la adición de humedad.

Los estudios de rayos X han mostrado que el espacio enrejado en la dirección C puede cambiar de 9.6 Å a 21.4 Å cuando el contenido de humedad varía de 0% a 30%. Como los estratos de agua ocupan espacio entre las estructuras de "sándwich", algunos empiezan a separarse completamente y pueden absorber iones metálicos en sus superficies interiores. Otras partículas de montmorillonita pueden consistir de estructuras parcialmente separadas, dependiendo de la cantidad de agua intersticial, mientras otras partículas pueden consistir de numerosas estructuras amontonadas continuas.

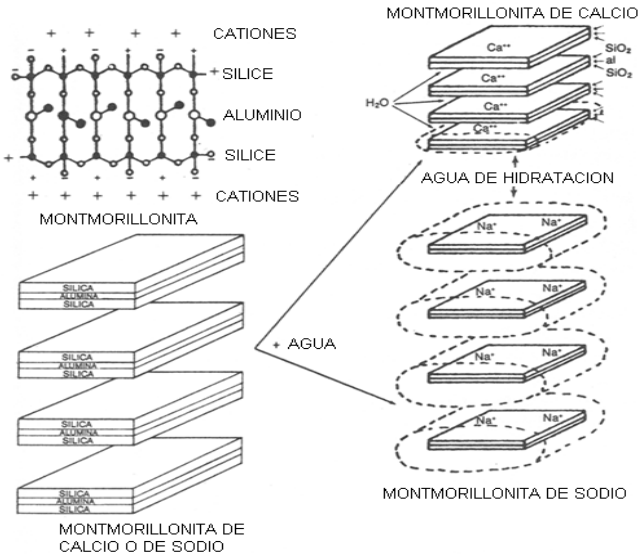


Fig. 3.12 Agua de hidratación de la montmorillonita de calcio o de sodio

Las illitas (micas hidratadas) tienen una estructura de 3 estratos similar a la de la mortmorillita pero no exhiben hinchamiento entre los estratos sobre el contacto con el agua. Esta característica de no hinchamiento es atribuible a el catión de potasio en los estratos de la estructura illita. Este catión interno no puede ser intercambiado por otros cationes, solo el potasio de la superficie externa de la estructura es una base intercambiable. Consecuentemente, la capacidad de intercambio catiónica de las illitas son menores que las obtenidas por las montmorillonitas, variando en MTB de 10 a 40 lb/100 lb de arcillas de illita.

La estructura enrejada cristalina de la caolinita consiste de sucesivos enrejados de aluminio y sílice de dos estratos. Estos enrejados están estrechamente adheridos y no existen "sanwdichs" extremadamente pequeños, como es típico de las partículas de montmorillonita. La distribución de carga dentro de la estructura de enrejado es balanceada y la capacidad de intercambio básica es completamente baja, variando de 3 a 15 lb/100lb de arcillas de caolinita.

Todas las arcillas son minerales residuales, el resultado de un largo tiempo de intemperismo del feldespato y otras rocas que no contienen feldespato pero llegan a ser plásticas sobre la hidratación. La temperatura, las condiciones climatologicas y la presencia

de minerales reactivos son útiles para determinar el mineral arcilloso especifico formado por el proceso de intemperismo. Los análisis químicos de las arcillas muestran ser esencialmente sílice, aluminio y aguas asociadas con varias cantidades de metales alcalinos y metales alcalino terreos.

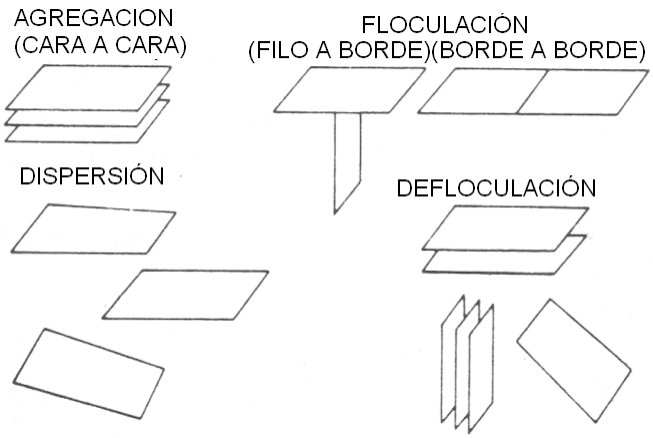


Fig. 3.13 Asociación de partículas arcillosas

Estructuralmente, la montmorillonita es una arcilla de 3 estratos compuesta con dos estratos de sílice externos y un estrato de aluminio interno. Las Fig. 3.12 y 3.13 muestran la composición estructural y como los estratos son apilados en una configuración como de placa similar a la de una cubierta de carros. Estas figuras también muestran el efecto de hidratación obtenido cuando el catión asociado es ya sea sodio o calcio. Por años se pensó que la montmorillonita tenia la misma formula química como la pirofilita. No obstante, los análisis químicos muestran consistentemente que el magnesio o los cationes de calcio estaban asociados con la molécula de la montmorillonita. Las conclusiones fueron que la única diferencia química entre la pirofilita y la montmorillonita fue la presencia de magnesio en este último material, y que este catión fue responsable por las únicas cualidades de la montmorillonita como un material para hacer lodo. Que esta sucediendo aparentemente que un átomo de magnesio tiene una valencia de 2^+ sustituyendo por un átomo de aluminio de valencia 3^+, el cual crea un desequilibrio eléctrico resultando en un exceso de carga negativa. Esta carga negativa es entonces compensada por un Ion de simple valencia que, dependiendo del medio ambiente que lo rodea, puede ser sodio o una mitad de un átomo de calcio de doble valencia.

III.4 Clasificación de areniscas

Hay muchas clasificaciones de las rocas sedimentarias, por ejemplo una mezcla de 3 componentes se representa gráficamente mediante un diagrama triangular. Tal diagrama se basa en el hecho que la suma del valor de las

perpendiculares a los lados, trazadas en un triángulo equilátero, desde un punto cualquiera dentro de él, es un valor constante. El largo de cada perpendicular puede tomarse como la parte proporcional de cada componente. Por ello en la Fig. 3.14 a), X+Y+M=100. Cada lado del triangulo, en efecto, es una mezcla de dos componentes. Por lo tanto, una mezcla ternaria consta de 3 mezclas binarias [(9)]. La Fig. 3.14 b), muestra una clasificación de los sedimentos comunes.

Los sedimentos detríticos se pueden agrupar en depósitos epiclásticos y volcaniclásticos. Los depósitos epiclásticos son aquellos formados por fragmentos derivados de rocas preexistentes por la acción del intemperismo y la erosión, por lo que están compuestos principalmente de minerales silicatados y fragmentos de rocas sedimentarias, ígneas y/o metamórficas.

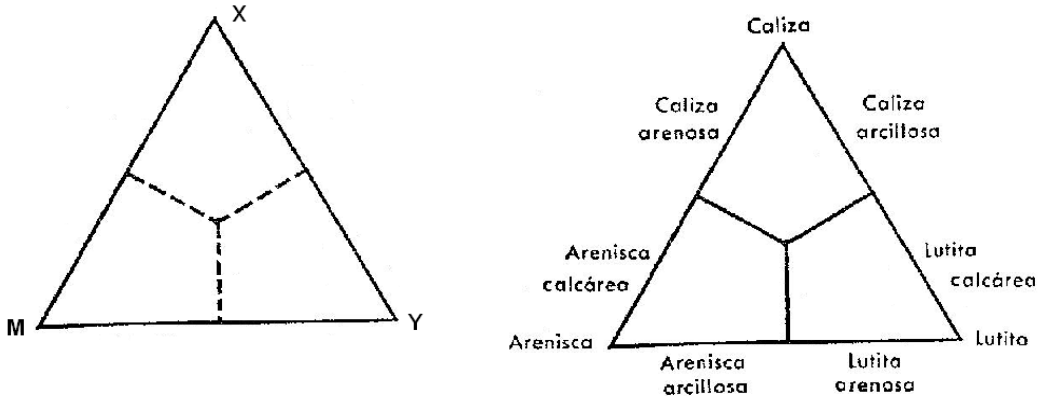


Fig. 3.14 a) Sedimento de tres componentes representado por un diagrama ternario.
b) Clasificación y nomenclatura de los sedimentos comunes.
(Modificado de Pirsson y Schuchert.)

Por otra parte, los sedimentos volcanoclásticos son especialmente ricos en detritos volcánicos, y pueden ser derivados directamente de una actividad volcánica explosiva, o bien, pueden ser detritos epiclásticos derivados de rocas volcánicas más antiguas. Sin embargo para efectos de clasificación en este trabajo, se tratan solamente sedimentos de origen epiclasticos. La clasificación de areniscas se debe a sus constituyentes mayores como son el cuarzo, feldespatos y fragmentos de roca. *Algunos tipos de arenas son:*

Las *arenitas de cuarzo* (Fig. 3.15) llamadas también ortocuarcitas o cuarzoarenitas están constituidas por más del 95% de cuarzo, y algunas contienen algo de cemento

carbonatado. Las características de las arenitas de cuarzo es que son de color blanco, rosaceo y algunas rojas (hematita cubriendo granos) [10]

Fig. 3.15 Cuarzo

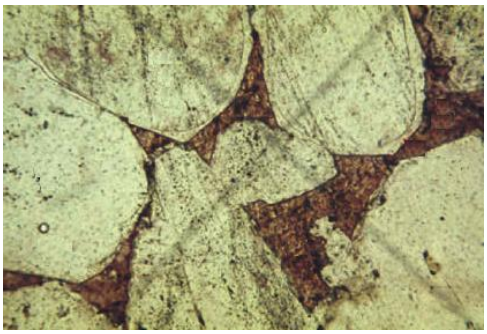


Fig. 3.16 Cuarzoarenita

Fig. 3.17 Arcosa

Fig. 3.18 a) y b) Grawacka

La cuarzoarenita es una arenisca muy madura con más de un 95% de cuarzo. El ejemplar de las fotografías (Fig. 3.16) es una arenisca roja con clastos de cuarzo (subredondeados) en una matriz también de cuarzo, que ha cristalizado en continuidad óptica con los granos (recrecimientos secundarios). La superficie de los clastos esta recubierta de una fina película de compuestos de hierro [11]

Las arenitas feldespáticas también conocidas como arcosas, son aquellas areniscas que contienen menos del 90% de cuarzo y más porcentaje de feldespato que de fragmento de roca.

El aspecto grueso de feldespatos y cuarzos derivados de rocas ígneas acidas de textura granitoíde, con micas y arcillas, puede o no contener matriz de arcilla con un contenido promedio de feldespatos mayor al 25%.

La arenisca feldespática posee un contenido apreciable de feldespatos (arcosas y otros). En tanto la subarcosa contiene 10-25% de feldespatos.

La wacka arcósica depende de la clasificación (Pettijohn). Es una arcosa con matriz.

La arcosa es una arenisca con menos del 15% de matriz, menos del 25% de cuarzo, menos del 25% de feldespatos y menos de un 75% de fragmentos rocosos.

La Fig. 3.17 muestra la foto de una Arcosa, sus componentes son granos de cuarzo, feldespato, mica. La foto es una Arcosa [12], teñida de rojo por óxidos de hierro; son claramente visibles los fragmentos de feldespato.

Las arenitas líticas son conocidas por su alto contenido en fragmentos de roca. Así, cualquier arenisca que contenga menor proporción del 95% de cuarzo (incluyendo policristalino y pedernal) y fragmentos de roca mayor a los feldespatos, es una arenita lítica. Son areniscas con contenido substancial de fragmentos de roca, poco o sin matriz, espacio (poro) vacío o con cementante. De color gris claro con abundantes fragmentos de rocas sedimentarias y metamórficas de bajo grado.

El cuarzo es subangular a redondeado. Mas redondeado en las arcosas y grauwackas.

Las grauwackas son de color gris oscuro a negro, granos angulosos, clasificación pobre, de acuerdo a la clasificación de Pettijohn. Son minerales inestables (feldespatos y micas). Las grauwackas (Fig. 3.18) son areniscas con más del 15% de matriz. El ejemplar de las fotografías [13] muestra clastos angulosos de cuarzo, feldespatos (ortoclasa y plagioclasa sódica) y pocos fragmentos de rocas (granito, cuarcita y gneis). La matriz esta constituida por clorita, cuarzo, sericita, carbonatos, leucoxeno, magnetita y pirita. También están presentes algunos granos detríticos de muscovita, esfena, turmalina y epidota.

III.5 Principales rocas sedimentarias

Las rocas carbonatadas más conocidas y que tienen mayor importancia económica ya que en México, el 95% de los yacimientos petroleros se encuentran en rocas de carbonatos son: Marga, Caliza y Dolomía.

La Marga es una roca arcillosa con un contenido de carbonato de calcio de un 30 a un 50%. **La caliza** es una roca constituida en su mayor parte por carbonato de calcio con algunas impurezas como arcilla, sílice, material carbonáceo etc. el contenido de carbonato de calcio va de 50 a 95%. **La dolomía** es una roca carbonatada constituida por más del 50% de carbonato de magnesio sin descartar que existan probablemente todos los grados comprendidos entre la caliza y la dolomita pura.

III.6 Composición de las rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se tienen en diferentes proporciones alguno o varios de los siguientes componentes:

Lutita pertenece a las rocas terrígenas, formadas por material arcilloso. Su composición es de hidrosilicatos de aluminio, potasio, hierro, material orgánico y óxidos de hierro. Según su dureza puede ser plástica, suave, semidura, dura y compacta. Comúnmente presenta contaminación por carbonatos. Su granularidad se clasifica entre 1/16 y 1/125 mm. La Fig. 3. 19 a) y b) muestran una lutita gris claro y una lutita café claro.

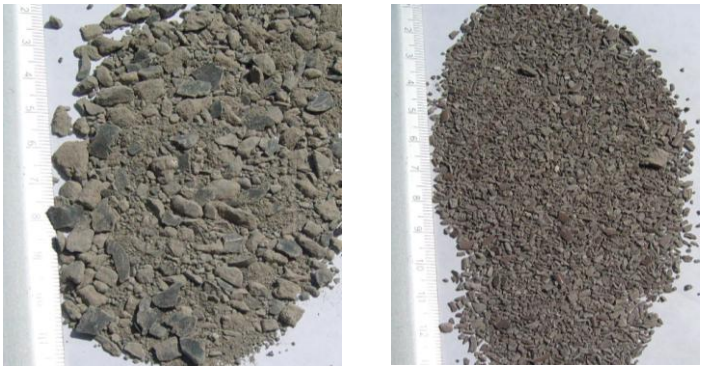


Fig. 3.19 a) Lutita gris claro, b) lutita café claro

Arenisca. Su composición es principalmente de granos de cuarzo, unidos por un material cementante como carbonato de calcio, sílice y material arcilloso. Las areniscas son las más importantes y distribuidas de las rocas clásticas sedimentarias.

La composición mineralógica de las areniscas es una propiedad física fundamental, ya que a partir de esta, el petrógrafo puede determinar la clasificación específica de la muestra estudiada.

De manera general, la composición mineralógica de las areniscas depende de los siguientes factores:

- Litología del área fuente.
- La resistencia de los minerales al intemperismo.
- El tiempo y la distancia de transportes de los fragmentos.
- La resistencia del mineral a la abrasión.
- Las condiciones del ambiente de depósito en que los fragmentos son sedimentados.

***El* conglomerado** son guijas y gravas redondeadas y consolidadas. Varían en su composición de acuerdo a su tamaño, clase y tipo de matriz, con respecto a las rocas que lo constituyen. La mayoría de los conglomerados son de partículas difícilmente clasificables. La matriz de los conglomerados consta de arena, fango y arcilla. Son de granos gruesos y fragmentos de rocas bien redondeados, de textura detrítica o plástica. La grava cementada se llama conglomerado, la Fig. 3.20 muestra una imagen de un conglomerado, sus componentes son grava redondeada, cemento calcáreo-arcilloso, arenoso. La foto muestra un conglomerado [(12)] formado por fragmentos redondeados, de distintos tamaños, de rocas cristalinas y calizas, con cemento calcáreo a arcilloso.

Los intersticios entre los guijarros suelen rellenarse con arena o con materiales más finos. Las aguas que circulan a través de depósitos de grava pueden precipitar sílice, carbonato de calcio y óxidos de hierro, que actúan como cemento para ligar las partículas de grava entre si y formar conglomerados. Un contenido de tipo arcilloso puede endurecerse por compactación y deshidratación y constituir un material de cementación.

***La* brecha** es cualquier tipo de roca o un conjunto de rocas formado por fragmentos angulosos. Son generalmente de origen tectónico y piroclástico. La brecha tiene como componentes, fragmentos de roca no redondeados, masa de compactación arenosa, calcárea o arcillosa; existen también brechas metalíferas en las que se han compactado fragmentos de rocas metalíferas. La Fig. 3.21 muestra una brecha [(12)] formada por fragmentos angulosos de caliza.

***La* marga** es una roca arcillosa con contenido de 30 a 50% de carbonato de calcio. Generalmente son zonas intermedias entre la caliza y lutita. Reacciona débilmente con acido clorhídrico, dejando una gran cantidad de restos arcillosos.

La marga es una caliza cuyo componente principal es la calcita y sus componentes secundarios son limonita, dolomía, cuarzo, minerales arcillosos, sustancias orgánicas disueltas en capas. La Fig. 3.22 muestra una marga calcárea bituminosa [(12)] con sustancias orgánicas disueltas en capas.

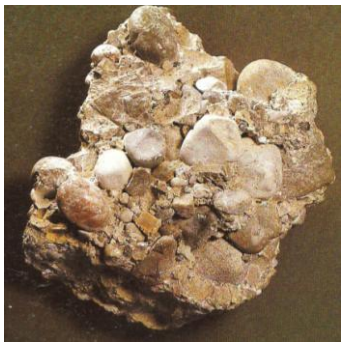


Fig. 3.20 Conglomerado Fig. 3.21 Brecha Fig. 3.22 Marga

Caliza. Su composición es de carbonato de calcio en una concentración de 50 a 96%, con algo de material accesorio, que da como resultado la formación de las demás rocas afines a la caliza. El componente principal de la caliza es la calcita y sus componentes secundarios son la limonita, dolomía, cuarzo, minerales arcillosos y sustancias orgánicas. La Fig. 3.23 muestra una caliza silícea [(12)] con elevado contenido en cuarzo, que se manifiesta por la inclusión de numerosos nódulos de pedernal. La Fig. 3.24 muestra una caliza de grano fino [(12)], poco estratificada, división superior del jurasico.

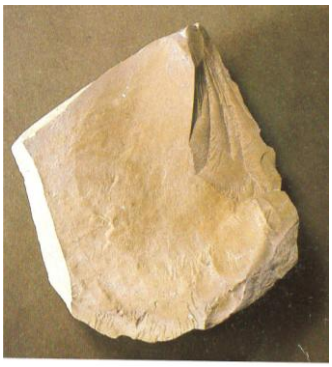


Fig. 3.23 Caliza Silícea Fig. 3.24 Caliza de grano fino Fig. 3.25 Dolomía

***La* dolomía** es una variedad de roca carbonatada que contiene más del 50% de carbonato de magnesio. Su componente principal es la dolomita y sus componentes secundarios son calcita, limonita y cuarzo. La Fig. 3.25 muestra una dolomía de grano fino [(12)], no estratificada, del Triásico. Esta roca, que a simple vista no puede ser diferenciada de la caliza, se clasifica utilizando el ensayo del ácido clorhídrico.

La mayoría de las dolomías son de color claro en un fragmento fresco, pero se vuelven amarillentas y pardas al exponerse al aire, debido a la oxidación del hierro ferroso contenido en los cristales de dolomita. La dolomitización se presenta con un

alto grado de recristalización; es de mayor dureza que la caliza, no reacciona fácilmente con acido clorhídrico diluido, pero reacciona lento con acido caliente. La mayoría de las dolomías se han formado por alteración postdepositacional de la caliza, es decir, por dolomitización. La única fuente adecuada de magnesio para la gran mayoría de las dolomías es el mar y la presencia de bentonita en abundancia, ya que su material constituyente es montmorillonita, y esta es, a su vez es una fuente muy importante de aportación de magnesio.

***El* cuarzo** es el mayor constituyente detrítico, del 35 al 50% de la fracción terrígena de las rocas sedimentarias. Mineral más durable por su dureza, resistencia y falta de clivaje. Bajo casi todas las condiciones superficiales, muy poco cuarzo se disuelve por intemperismo.

El cuarzo en las areniscas puede presentarse en tres formas:

- Cuarzo Monocristalino: un solo cristal
- Cuarzo Policristalino: agregado de cristales
- Cuarzo Microcristalino: agregado de cristales pero muy finos

Las variedades más útiles para la evaluación del origen son:

- Cuarzo policristalino
- Pedernal
- Cuarzo con crecimiento secundario.

Los tipos de cuarzo en base a la clasificación genética:

- Monocristalino
- Ígneo
- Plutónico: más abundante
- Volcánico: no muy abundante
- Policristalino

El cuarzo después de sufrir metamorfosis se presenta como:

- Recristalizado: bajo tensión sin cizalla.
- Esquistoso: inyección de esquistos y recristalización de rocas esquistosas.
- Tensionado: roca con cuarzo cizallada y tensionada.
- Megacuarzo: granos de cuarzo, recrecimientos retrabajados formados por una arenisca o caliza mas vieja.
- Microcuarzo: pedernal y calcedonia.

El pedernal es un mineral químicamente precipitado, esencialmente monominerálico y compuesto de cuarzo microcristalino y calcedónico.

Los granos de pedernal pueden originarse de la erosión de capas de caliza y pedernal y formar parte de los constituyentes de una arenisca para después ser retrabajado de nuevo. Ligeramente menos durable que el cuarzo (mas suave y mas quebradizo).

Puede ser de origen volcánico y muy probablemente su composición química no sea exclusivamente SiO. En la Fig. 3.26 se muestra un ejemplo de un pedernal [14].

Fig. 3.26 Pedernal

Fig. 3.27 Ópalo

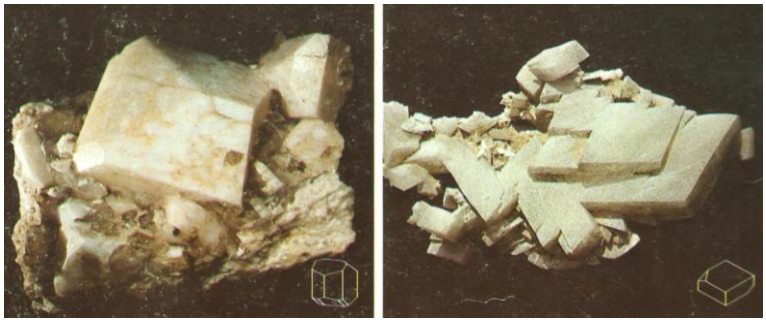


Fig. 3.28 Feldespato potásico a) y b)

El ópalo (Fig. 3.27) gel de sílice isotrópo con relieve alto, raro en sedimentos, no se ha encontrado en rocas más viejas que el Pérmico [12]. Formado orgánicamente por diatomeas, radiolarios o espículas e inorgánicamente como cemento en areniscas, nódulos, costras de intemperismo, rellenos de geodas y vetas. La forma de ópalo más común es de origen volcánico. Pedernal y sílice opalino se encuentran también como cementos, rellenando poros como anillos alrededor de granos de cuarzo detrítico.

El feldespato es un mineral muy importante en rocas detríticas. Constituye del 8.5 al 12%, y es muy abundante en arenas modernas de orígenes diversos. El feldespato potásico tiene una dureza de 6; color blanco, amarillo, pardo, rojo o color carne; brillo vítreo; forma cristalina monoclínica y triclínica. La Fig. 3.28 a) es un feldespato potásico, es un cristal prismático corto con cuarzo y b) es un feldespato potásico [12] recubierto de clorita (verde).

Algunas areniscas no contienen feldespatos pero otras pueden contener más del 90%. Las arenas de los ríos parecen ser más feldespáticas que las dunas o arenas de playa.

Su abundancia es debida a:

- Composición de la roca madre
- Intemperismo químico en el lugar de origen
- Solución durante la diagénesis

Las clases de feldespatos son (según Feldk): ortoclasa, sanidina, microclina, anortoclasa y plagioclasa.

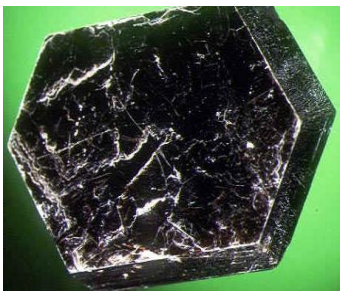
Feldespato potásico (microclina) es característico de muchas arcosas, pero en menor proporción que la ortoclasa. Las variedades sódicas predominan, son los únicos feldespatos en las grauwackas.

El feldespato es mas blando que el cuarzo y tiene mejor crucero, es inestable bajo condiciones hidrotermales y de intemperismo.

La alteración del cuarzo se refleja en:

- La caolinización en microplacas con birrefringencia muy baja
- La seritización que es la alteración a micro placas arcillosas
- La vacuolización son burbujas diminutas rellenas de agua.

Las micas y arcillas son consideradas como un solo grupo, por su composición química (aluminosilicato hidratado) y estructura cristalina (laminas). Granos grandes: Biotita, muscovita y clorita, como se muestran en la Fig. 3.27 a), b) y c) respectivamente. La biotita tiene una dureza de 2.5 a 3; de color pardo oscuro, verde oscuro o rojizo; forma cristalina monoclínica y la Fig. 3.29 a) corresponde a un cristal tabular hexagonal [(12)].



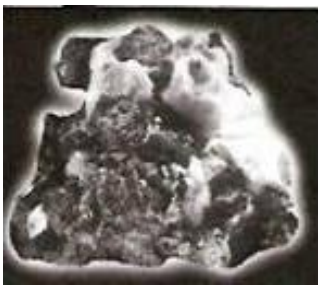


Fig. 3.29 a) Biotita b) Muscovita c) Clorita

Raramente forman más del 2% de la roca. Menor del 0.5% de la fracción terrígena.
La mica es un mineral muy durable, extremadamente difícil de redondear y casi imposible de fracturar. Es estable excepto en condiciones muy calientes y húmedas.
Se comporta como partícula mucho más pequeña. Se depositan con arcillas finas.
Es un constituyente esencial de matriz y fragmentos argiláceos, constituye del 25-35% de la fracción terrígena.

Los minerales pesados, llamados así porque presentan un peso especifico mayor a 2.85, incluyen varios silicatos y óxidos: magnetita, turmalina, circón, rutilo, esfena y olivino (aunque muy raro), que son encontrados en pequeñas cantidades (<1%) en las areniscas. La preservación en las areniscas de los minerales pesados se debe a que presentan alta resistencia a la acción del clima, diagénesis y degradación. Los minerales pesados ocurren en un rango restringido, y son muy útiles para la interpretación de la fuente de roca.

Podemos agrupar a los minerales pesados en:

a) Minerales pesados no opacos

- Ultraestables: Rutilo, circón y turmalina, en las Fig. 3.30 a) y b) se muestra el circón y la turmalina respectivamente [12]
- Estables: Apatito, granate, estaurolita, monacita y biotita, en las Fig. 3.31 a) y b), y c) se muestra el apatito [12], y granate respectivamente.
- Moderadamente estables: Epidota (Fig. 3.32 a)), kianita, granate, silimanita, esfena [12] (Fig. 3.32 b)) y zoisita.
- Inestables: Hornblenda [12] (Fig. 3.33 a)), actinolita, augita [12] (Fig. 3.33 b)), diópsida, hiperstena y andalucita.
- Muy inestables: Olivino (Fig. 3.34)
- Estabilidad relativa no bien definida: Ankerita, barita [12] (Fig. 3.35 a)), brokita, casiterita, clinozoita, cromita, fluorita (Fig. 3.35 b)), glaucofano, lawsonita,

magnesita, pirrotita, pumpelita, flogopita, siderita, espinela, topacio, vesubianita, wolframita, zoisita y otros.

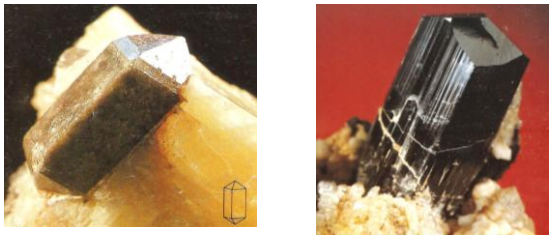


Fig. 3.30 Minerales ultraestables: a) Circón y b) Turmalina

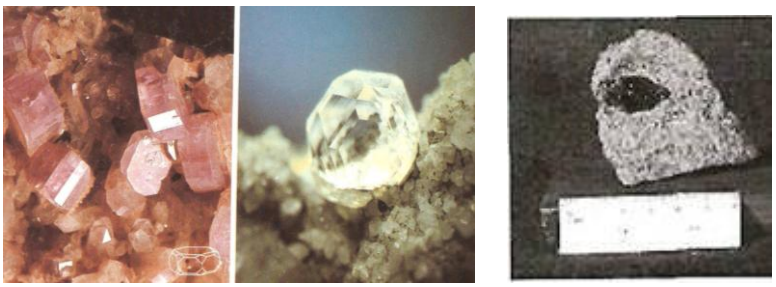


Fig. 3.31Minerales estables: a) y b) Apatito, y c) Granate

Fig. 3.32 Minerales moderadamente estables: a) Epidota y b) Esfena

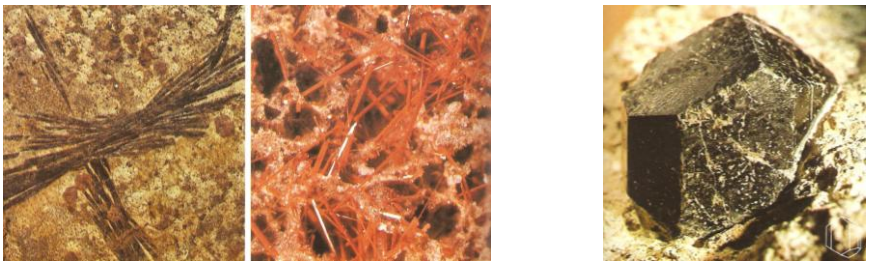


Fig. 3.33 Minerales inestables: a) y b) Hornblenda y c) Augita

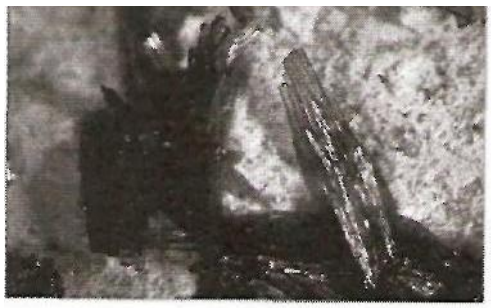


Fig. 3.34 Material muy inestable, olivino

Fig. 3.35 Minerales de estabilidad no bien definida: a) Barita y b) Fluorita

Los *fragmentos de roca* son los mejores indicadores de proveniencia. Los fragmentos de roca son granos polimineráliticos y algunos policristalinos (pedemal y feldespatos). El cuarzo policristalino y pedernal pueden ser considerados como fragmentos de roca.

Principales tipos de fragmentos de roca son los argiláceos (lutita, pizarra, esquisto); los volcánicos (rocas volcánicas, incluyendo vidrio) y el sílice (cuarzo, pedemal).

Los fragmentos de roca argiláceos, Fig.s 3.36 a) y b), pueden ser aplastados, deformados y amoldados alrededor de los granos más competentes y parecer parte de la matriz. Su abundancia indica proximidad a la roca madre.

Los *fragmentos de roca volcánicos*, Fig. 3.37, son abundantes en algunas areniscas, incluyen partículas piroclásticas. Algunas rocas pueden ser consideradas como rocas volcánicas o como rocas hechas de fragmentos.

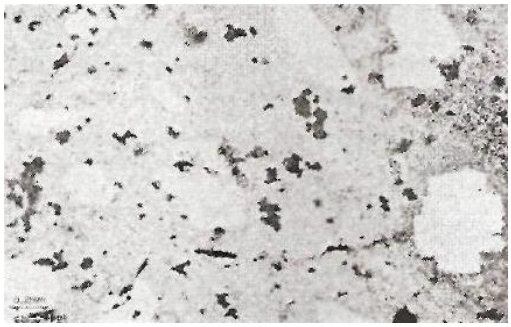
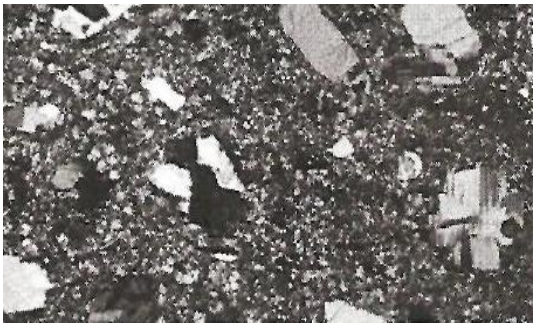



Fig. 3.36 a) y b) Fragmentos de rocas argiláceos

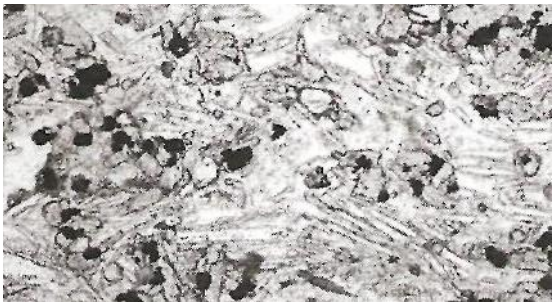


Fig. 3.37 Fragmentos de roca volcánicos

Los *fragmentos de roca metamórficas* conforman del 5-15% de la fracción de los sedimentos como son granos de pizarra [12] (Fig. 3. 38), filitas, metacuarcita, o gneis del tamaño de arena o grava. Bastantes durables si se componen principalmente de cuarzo, pero bastante blandos si se componen de micas. Los más blandos se redondean más rápidamente. Moderadamente estables químicamente (cuarzo y mica).

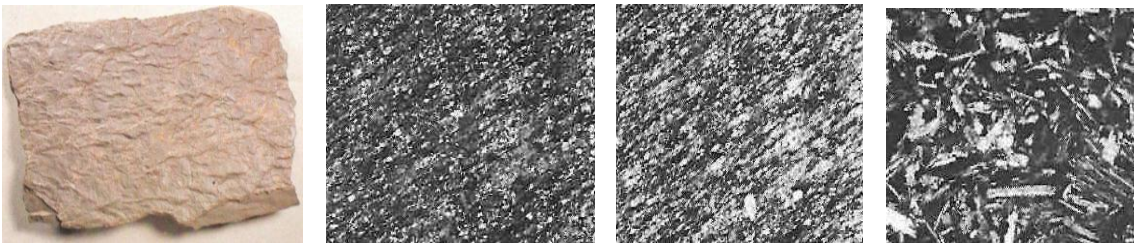


Fig. 3.38 a) Pizarra, b), c) y d) granos de pizarra

Los *fragmentos de roca sedimentarias* son comunes en conglomerados, aunque muchas arenas contienen granos de lodo, lutita, arenisca fina (Fig. 3.39) y caliza, Fig. 3.40 a) y b). Generalmente no son resistentes a la abrasión por lo tanto si están presentes en grandes cantidades indican transporte corto.

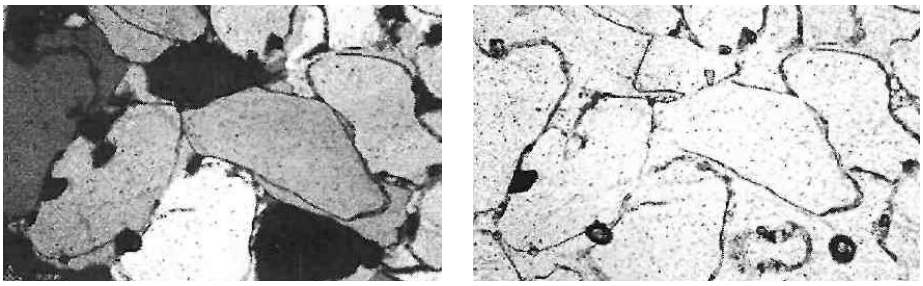


Fig. 3.39 Areniscas a) y b)

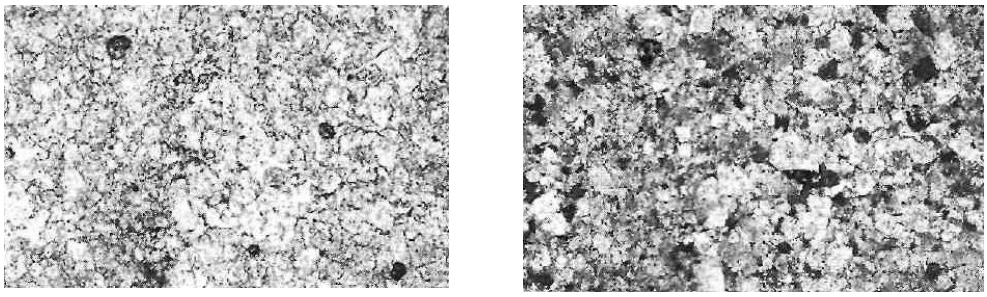


Fig. 3.40 Calizas a) y b)

Los *minerales autigénicos* son aquellos minerales que se forman "in situ" dentro de los sedimentos después de su depositación, mientras que estos están aun sin consolidar; o bien, se forman durante el enterramiento y la diagénesis. Estos minerales pueden presentarse como cementantes, cristalizar en los poros como minerales nuevos o formarse por reemplazamiento de minerales detríticos originales. Los minerales autigénicos con más frecuencia encontrados en las areniscas son el cuarzo (por sobrecrecimiento) y la calcita, pero también lo son: ópalo, calcedonia, feldespatos, arcillas, glauconita, dolomita, siderita, óxidos de fierro, sulfatos, sulfuros, zeolitas y fosfato.

III.7 Rocas Evaporiticas

Las rocas evaporitas son un grupo de rocas de depósito sedimentario formado por precipitación de sales procedentes de cuerpos de disoluciones concentradas o salmueras, rodeadas de tierra; como la concentración es ocasionada por la evaporación se les ha llamado colectivamente evaporitas. Las más comunes son el yeso, la anhidrita y la halita.

Yeso ($CaSO_4.2H_20$) es un sulfato de calcio hidratado que varia de suave a semiduro y en ocasiones fibroso, monoclínico, límpido e incoloro cuando es puro, con brillo vítreo y madreperlaceo. Los agregados de yeso ocurren en masas no uniformes o en mantos de estratificación perturbada, debido a la dilatación que tiene lugar durante la hidratación. Su textura es generalmente fibrosa, o bien puede consistir en cristales anhedrales de entrelazamiento intrincado.

***La* anhidrita** ($CaSO_4$) a diferencia del yeso se presenta en forma de depósitos uniformemente estratificados, con mosaico de granos anhedrales entrelazados o con cristales grandes bien formados, acomodados en un mosaico de grano fino en su base. El color del yeso y la anhidrita varía de blanco a translucido, rosa o café.

Puede presentarse en forma masiva o compacta. Si es compacta, su textura es cristalina, sus cristales no presentan ralladura ni fibras.

Halita (NaCl) su nombre común es sal, casi siempre es de notable pureza y ocurre en mantos transparentes o translucidos, su color es grisáceo, blanco o amarillo, su textura es cristalina gruesa.

El grosor de los estratos puede ser desde centímetros hasta muchos metros. Comúnmente se encuentra asociada con otras evaporitas como el yeso a la anhidrita.

Puede ocurrir en forma de domo. Un domo de sal consiste en un núcleo central de sal en roca y un domo circundante de sedimentos. Los núcleos de muchos domos de sal se han emplazado por intrusión en los estratos sedimentarios adyacentes.

La sal es una roca sedimentaria que juega un papel muy importante en la geología estructural debido a su baja densidad (de 2.17 a 2.2 gr/cm^3) y a su baja viscosidad equivalente.

Los domos salinos son ejemplo de cuerpos rocosos que se mueven hacia arriba traspasando los estratos superiores. El fenómeno que ocasiona este tipo de eventos es llamado diapirismo, que no es otra cosa que el movimiento debido a la diferencia de densidad entre la sal y las rocas más pesadas de los estratos superiores. La roca salina está formada por halita (NaCl), cuya característica principal es que su densidad no varía con la profundidad; es decir, no existen fenómenos de compactación al incrementar la columna de sobrecarga con la profundidad. Algunas impurezas están presentes en el domo salino, como son las anhidritas ($CaSO_4$), cuya densidad es de alrededor de 2.98 g/ cm^3.

Los domos salinos son de diferentes tamaños un ejemplo es uno de un diámetro de alrededor de 2 a 3 km, y además se pueden extender hacia abajo muchos kilómetros. La estructura interior de la sal está dominada por plegamientos muy apretados en el medio. Este plegamiento puede ser asociado en parte al movimiento continuo hacia arriba, cuya complejidad es característica [(15)].

III.8 Lutitas

Las Lutitas (también llamada “shales”) son una roca sedimentaria, compacta, formada principalmente por minerales arcillosos entre los cuales predominan esmectita e ilita asociados a contenidos menores de minerales no arcillosos como la plagiclasa, feldespato y cuarzo. La composición química de los minerales arcillosos, influye en sus propiedades físicas y químicas [(16)], cubren un amplio rango de composiciones por lo que presentan propiedades mecánicas, petrofísicas y fisicoquímicas muy diferentes [(17)]. Ver Tabla 3.10

Tabla 3.10 Propiedades de las lutitas

LUTITAS

Lutita = Pelita ≈ Argilita ≈ [Aleurita] (Mudrocks)

DENOMINACIÓN:

- **SEDIMENTOS Y ROCAS TIPO** → f (tamaño, grado de consolidación):

Diámetro (μm)	125	62	31	16	8	4	2	1	0,5	
TAMAÑO	←								→	
Escala (Φ)	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9	+10	+11	
Elemento:	GRANO	PARTÍCULA								
Sedimento:	ARENA	LIMO					ARCILLA			
Roca:	ARENISCA	LIMOLITA					ARCILLITA			
		GRUESA	MEDIA	FINA	MUY FINA	G	M	F	M F	

- **ROCAS MEZCLA** → f (tamaño de grano, desarrollo de fisilidad):

LIMO: 100% — 2:1 — 1:2 — 0%

ARCILLA: 0% — 1:2 — 2:1 — 100%

Sedimento		LIMO (Silt)	LODO (Mud)	ARCILLA (Clay)
Roca	· masiva	LIMOLITA (Siltstone)	LUTITA (s.s.) (Mudstone)	ARCILLITA (Claystone)
	· fisil	LUTITA FISIL (Shale)		
	· con foliación	PIZARRA METAMÓRFICA (Argillite, Slate)		

COMPONENTES PETROGRÁFICOS Y MINERALOGÍA:

Componentes petrográficos* → f(tamaño de grano)		Composición mineral* → f(mineralogía)		
LIMO (< 62 μm)	⇒ 60%	CUARZO (limo)	⇒ 30%	40%
		FELDESPATO	⇒ 5%	
		MICAS (moscovita)	⇒ 5%	
		ARCILLAS (> 4μm)	⇒ 20%	60%
ARCILLA (< 4 μm)	⇒ 40%	ARCILLAS	⇒ 40%	
*valores medios de una lutita tipo		OTROS: Carbonatos. Óxidos de Fe. Materia orgánica. Silice. Pirita...		

CLASIFICACIÓN

- **EN RELACIÓN CON LA COMPOSICIÓN:**
  - **LUTITA COMÚN** ↑ (distintas arcillas, cuarzo...)
  - **LUTITA MARGOSA** (calcita) → Rocas calcáreas: calcilutitas
  - **LUTITA SILÍCEA** (sílice ↑) → Rocas silíceas bioquímicas
  - **LUTITA FERRUGINOSA** (Fe ↑) → Rocas ferruginosas
  - **PIZARRA NEGRA:** (black shale)
    - **CARBONOSA** (pirita, siderita) → Rocas orgánicas: carbón
    - **BITUMINOSA** (min. autígenos ↑) → Rocas orgánicas: petróleo
  - **LOESS** (cuarzo tamaño limo, anguloso) ⇒ origen eólico
  - **CAOLIN** (caolinita ↑) ⇒ alteración de rocas ígneas ácidas
  - **BENTONITA** (montmorillonita ↑) ⇒ alter. rocas volcánoclásticas básicas

PRINCIPALES MINERALES DE LAS ARCILLAS

- **ESMECTITAS:** MONTMORILLONITA (Mg, Fe, Ca, Na) → CENOZOICO
- **CAOLINITA** (Al ↑↑) → MESOZOICO
- **ILLITA** (K)
- **INTERESTRATIFICADOS** → PALEOZOICO
- **CLORITA** (Fe, Mg) → PRECÁMBRICO

0 20 40 60 80 100 %

ORIGEN DE LAS ARCILLAS

→ **f (proceso de formación)**
- terrígenas → heredadas de otras rocas (ígneas ↑), sufren transporte
- autígenas → neoformadas "in situ" (en suelos, sedimentos, rocas)
- transformación de otras arcillas → alteración de rocas (volcánicas ↑)

→ **f (lugar = ambiente de formación)**
- área fuente → meteorización y formación de suelos: **TODAS**
- cuenca sedimentaria → sedimentación: **ILLITA ↑...**
- dentro del sedimento → diagénesis: **ILLITA, CLORITA**

TEXTURA

TIPO: ➢ **CLÁSTICA = DETRÍTICA**
- LODOSA = FINA — matriz = finos (< 62 μm)

ELEMENTO TEXTURAL:
- **ORIENTACIÓN** (arcillas) ⇒ **PROPIEDAD DE LA ROCA:**
  - **FISILIDAD** ↘ **HOJOSIDAD, LAJADO**

PROPIEDADES

- **COLOR:** ⇒ **f(componentes + ambiente)**

	COMPONENTES		AMBIENTE
ROJO	materia orgánica ↓↓	Fe^{3+} (hematites, goethita) ↑	oxidante
AMARILLO		Fe^{3+} (limonita) ↑	
BLANCO	materia orgánica ↓	Fe ↓ (caolinita)	ligeramente reductor
VERDE		Fe^{2+} (clorita, illita) ↑ > Fe^{3+}	
GRIS - NEGRO	materia orgánica ↑ (>3%)	Fe^{2+} (pirita) ↑	reductor

- **POROSIDAD:** en sedimentos ↑ → en rocas ↓ ⇒ ROCAS IMPERMEABLES
- **PODER DE ABSORCIÓN DE AGUA**
- **INTERCAMBIO DE CATIONES**
- **PLASTICIDAD**
- **HINCHAMIENTO ...**

} en sedimentos ↑

Los sólidos de una lutita típica pueden consistir de alrededor del 50% de arcilla, 25% de sílice, 10% de feldespato, 10% de carbonatos, 3% de oxido de hierro, 1% de material orgánico y 1% de otros minerales, asimismo pueden contener del 2 al 40% de agua por volumen.

La *arcilla* esta compuesta de minerales de arcilla cristalinos, principalmente de silicatos de aluminio hidratados, cuya formula general es $\underline{X}(Al_2O_3)$ $\underline{Y}(SiO_2)$ $\underline{Z}(0H)$. Contiene pequeñas cantidades de otros elementos como Mg, K, Fe y Ti. La arcilla de naturaleza detrítica es producto del intemperismo de la roca, su composición es muy variada, depende del ambiente y las condiciones de temperatura, humedad y acidez.

Las partículas de arcilla tienen una estructura de plaquetas en forma de capa. Las plaquetas son muy delgadas, 0.5 a 1 nm, pero llegan a tener una extensión de 1000 nm a lo largo y ancho. Estas se colocan una sobre otra con separaciones de 2 a 10 nm. Son de 10 a 100 veces menores que el promedio de los granos de arena mas pequeños (alrededor de 2 micrones, 10^{-4} cm).

Los minerales arcillosos que se clasifican en grupos específicos de acuerdo con las rocas sedimentarias son montmorillonita, ilita, caolinita y clorita. La Tabla 3.11 lista las propiedades de estos grupos de arcillas que son de importancia en la evaluación de formaciones.

Tabla 3.11 Tipos de arcillas

Tipo de arcilla	CEC meq/gr	ΦCNL	ρ (prom.) g/cm	Elementcs menores	Componentes del registro espectral K %	K ppm	U ppm
Montmori-ilonita	0.8 -1.5	0.24	2.45	Ca,Mg,Fe	0.16	2-5	14-24
ilita	0.1 -0.4	0.24	2.65	K,Mg,Fe,Ti	4.5	1.5	2
Clorita	0 -0.1	0.51	2.80	Mg, Fe		-	-
Caolinita	0.03-0.06	0.36	2.65		0.42	1.5-3	6-19

Para la tercera columna los valores de porosidad que el registro de neutrón compensado leería son en una roca con arcilla 100% seca. El hidrogeno presente en la arcilla es parte de la estructura cristalina y no contribuye a la conductividad.

La montmorillonita se hincha al contacto con el agua, sufre diagénesis la ilita a altas temperaturas. Esto ocasiona la eliminación de agua y contribuye a aumentar la presión de las arenas adyacentes.

Distribución de la arcilla o lutita en arenas arcillosas

La mayoría de las herramientas de registros tienen un promedio de resolución vertical de 2 a 4 pies. En estos intervalos la arcilla o lutita puede estar depositada en la arena de tres maneras: laminar, dispersa y estructural (Fig. 3.41).

a) Laminar. En esta forma se presenta en láminas de algunos centímetros de espesor, esta intercalada con arena limpia. La porosidad efectiva y la permeabilidad de las lutitas son nulas. Por ejemplo: una arena con 40% de lutita teóricamente reduce los valores de la porosidad efectiva y permeabilidad hasta un 60%. La arcilla en una lutita laminar es de origen detrítico. La arcilla se obtiene de diversos tipos de rocas y arenas, generalmente tiene dos o mas minerales de arcilla. Siguiendo la depositación, las laminaciones de lutita y arena tienden a ser homogéneas por el trabajo de los organismos y la infiltración de partículas de arcilla dentro de la arena por el movimiento del agua.

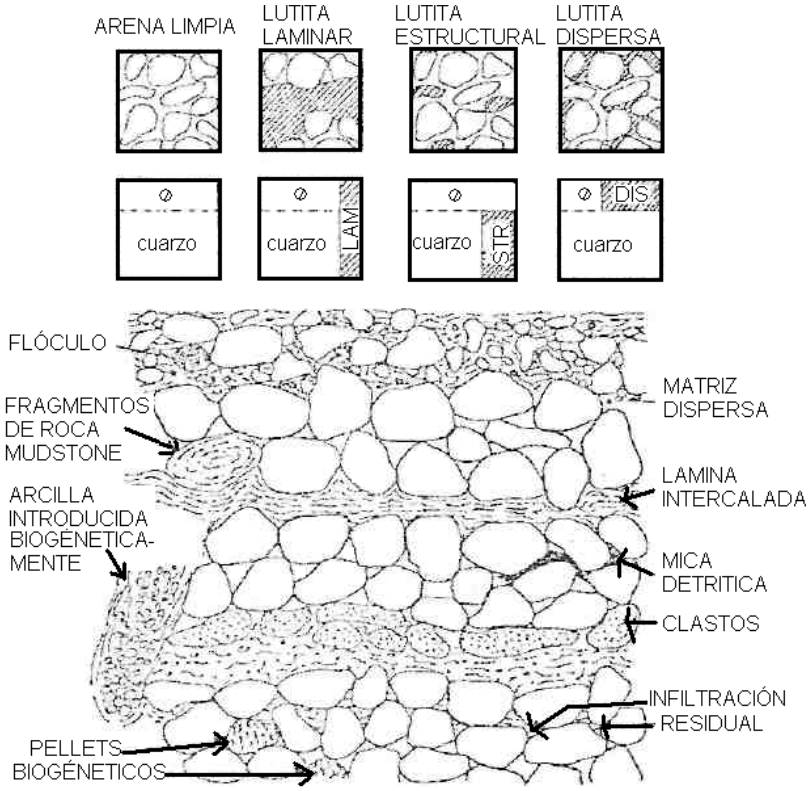


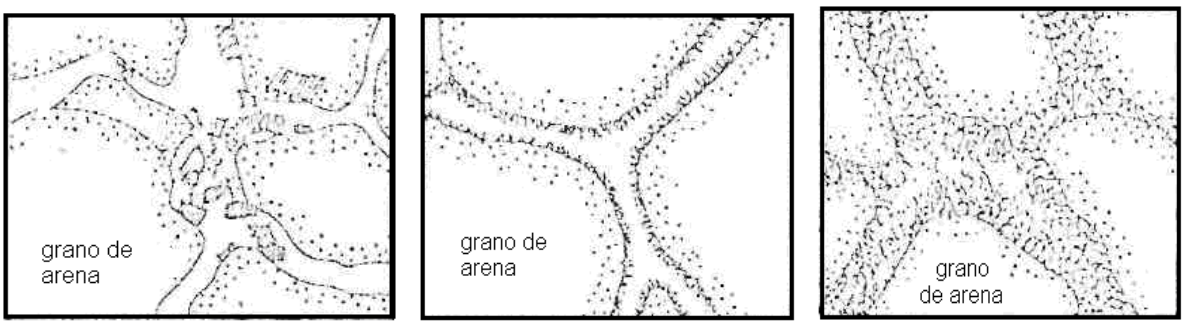
Fig. 3.41 Forma esquemática la que se puede distribuir la lutita en los sedimentos

b) Dispersa. En esta forma la arcilla, no la lutita, esta diseminada en el espacio poroso de la arena, reemplaza al fluido. Este tipo de distribución es muy dañina porque una pequeña cantidad de arcilla cierra los poros, reduce su porosidad efectiva y la permeabilidad. El máximo contenido de arcilla en la arena es de alrededor del 40%, que representa el 15% del volumen.

Mucha de esta arcilla es de origen autígeno. La arcilla autígena se desarrolla en el lugar después de la depositación de la arena, como resultado de interacciones químicas entre el fluido del poro y los constituyentes menores de la arena, tales como los feldespatos.

La arcilla autígena se caracteriza por ser de varios tipos: partículas discretas, de revestimiento y de tapón. Estos nombres se le han dado por la forma en que se generan en el poro. Las partículas discretas, generalmente caolinita, construyen plaquetas aisladas dentro el poro, ocasionando una baja muy pequeña de la porosidad efectiva y de la permeabilidad. La de revestimiento cubre los granos y forma micro poros que entrampan una buena cantidad de agua del poro, reducen la porosidad efectiva. La de tapón cierra totalmente el poro, disminuye bastante la porosidad efectiva y drásticamente la permeabilidad. La Fig. 3.42; muestra los efectos que produce en la permeabilidad la arcilla autígena.

Por su origen in situ, las arcillas autígenas tienden a ser más puras y cristalinas. Su composición puede variar radicalmente de las arcillas de tipo detrítico en las vecindades de las capas de lutita. Este tipo de arcillas no están sujetas a sobre presiones, de tal forma que una cantidad de arcilla (particularmente montmorillonita) puede entrapar mas agua. Es clásico en el análisis de registros considerar que la arcilla en arenas arcillosas tiene las mismas características que la arcilla de una lutita cercana.



a) Partícula dispersa b) Poro revestido c) Poro taponado

FIG. 3.42 Esquema de las formas en la que la arcilla autígena puede formarse en el espacio poroso (DEKAN, 1983, P. 234).

c) Estructural. Este tipo de arcilla ocurre menos. En esta forma los granos arcillosos toman el lugar de los granos de arena. No afecta a los registros. Sin embargo, la disposición particular de la arcilla afecta fuertemente la productividad de la formación. La arcilla dispersa es más dañina que la lutita laminar.

Los problemas más severos son provocados por una clase de minerales arcillosos clasificados como expandibles, entre los que se encuentran la esmectita, montmorillonita, la beidelita y sus interestratificados. Estos minerales predominan en las lodolitas (mudstone) y en lutitas como las asociadas a los yacimientos de petróleo. En el primer caso los minerales de encuentran como partículas desorientadas sometidas a baja presión y temperatura, mientras que en el segundo

están en forma de partículas orientadas y compactadas sometidas a mas alta presión y temperatura.

Las esmectitas o filosilicatos 2:1, llamados así por su organización laminar, tienen gran superficie activa resultante de su estructura, y también cationes o especies químicas, que en presencia de agua reaccionan, por hidratación de cationes, lo que provoca expansión en la esmectita y consecuentemente en la lutita, generando sobre presión, expansión y contracción en el estrato.

También este estrato es el que comúnmente contiene mayor cantidad de arcillas expandibles. Generalmente están constituidas principalmente por cuatro tipos de arcillas: esmectitas (montmorillonita), ilitas, caolinitas y clorita. De estos la clorita tiene también una estructura 2:1, y se caracteriza porque las láminas están unidas con hojas de Brucita, $Mg(OH)_2$, y por el reemplazo de silicio por aluminio en las hojas tetraédricas. La montmorillonita tiene las cualidades más distintivas, particularmente el cambio en el espaciamiento de la estructura cristalina que resulta de añadir agua. Estudios de rayos X han mostrado que el espaciamiento cristalino en la dirección del eje Z puede cambiar desde 0.96 nm a 2.14 nm cuando el contenido de humedad varía de 0 a 30%.

En la Fig. 3.43 se muestra el espaciamiento basal de la esmectita y de la vermiculita.

Son rocas de grano fino con abundante materia orgánica (hasta un 25%). Esta sedimentitas pueden ser silicoclásticas (lutitas, fangositas), carbonáticas (micritas) o de mezcla (margas). La materia orgánica está constituida esencialmente por kerógeno (80%) acompañado por bitumen (20%). Como indicadores de la madurez de la roca madre, se emplean los denominados biomarcadores. Entre ellos se encuentran: - Color de polen y esporas (palinomorfos), que con el aumento de temperatura pasan de tonalidades amarillas a castaña y finalmente a negras; - Reflectancia de la vitrinita. Este maceral aumenta su reflectividad con la temperatura (aumento del tamaño de las estructuras aromáticas en anillos); 3.- Color de alteración de conodontos (CAI) en una escala similar a la de polen y esporas [18].

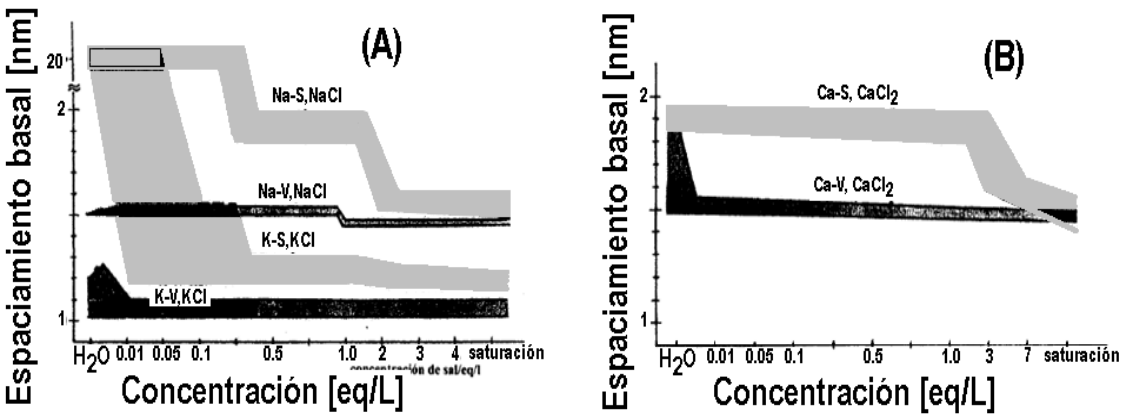


Fig. 3.43 Espaciamientos basales de esmectitas (S) y vermiculitas (V) en contacto con soluciones salinas acuosas.

Una clara distinción entre los términos arcilla y lutita, no así en la evaluación de perfiles, donde ambos términos se usan indistintamente para denominar la fracción de la roca ocupada por arcilla o lutita. En términos petroleros, se define como arcilla los silicatos complejos hidratados de aluminio que constituye la caolinita, illita, montmorillonita (Esmectita), clorita y vermiculita. La lutita es la roca de minerales de arcilla y algunas variedades de minerales con grano muy fino, como el óxido de hierro, micrita y materia orgánica [(19)].

La arcilla presente en las formaciones debe tomarse en cuenta para los efectos de los análisis de registros. Independientemente de su influencia sobre la porosidad y la permeabilidad, la importancia señalada se desprende de sus propiedades eléctricas, las cuales ejercen una influencia significativa en la determinación de las saturaciones de fluidos [(20)].

Es muy normal que las lutitas presenten una cierta cantidad de carbonato cálcico (menor del 50%) por el carácter aglomerante de éste, le da una mayor estabilidad frente al agua. Si el contenido es bastante grande (generalmente superior al 20%) la roca se denomina marga o marga caliza y da clara reacción con clorhídrico en frío. Si el contenido en caliza es pequeño la reacción no es aparente y la roca se denomina lutita margosa o marga silícea aunque este último nombre no es muy apropiado [(21)].

Análisis químicos muy precisos mostraron consistentemente que con la molécula de montmorillonita se encuentra asociado el catión magnesio, el cual influye en la característica de ser arcilla hidratable y de fácil dispersión en el agua. Lo que

aparentemente ocurre es que el catión magnesio con valencia 2+, sustituye a un átomo de aluminio de valencia 3+, lo que crea un desbalance eléctrico.

Numerosos estudios se han realizado para esclarecer y tomar medidas preventivas cuando se llegue al estrato de las lutitas, la gran mayoría enfocados al fluido de perforación sin considerar otras propiedades de este tipo de sedimento.

En un estudio realizado a una muestra de lutita (edad Oligoceno, profundidad 2465 m) se le sometió a estudios de caracterización (ver Tabla 3.12) y a diversas etapas de hidratación, utilizando electrolitos de Na, K, Mg y Ca (0.001 M y 0.001 M) para determinar la adsorción de cationes y su efecto sobre los minerales arcillosos. También se determino la capacidad de intercambio catiónico, para la transferencia de cationes entre la solución electrolito y la lutita, se empleo el Método de Debye para soluciones acuosas a 25 °C, y la presión osmótica de hinchamiento de la lutita se estimó según la teoría de la doble capa, considerando que la esmectita es el componente activo de la lutita.

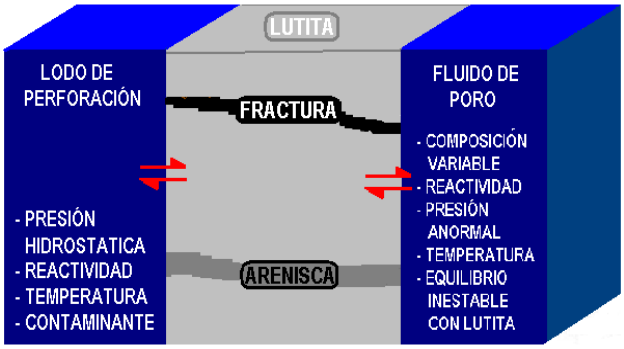
Tabla 3.12 Mineralogía y Capacidad de intercambio cationico de una muestra de lutita.

Mineral	%		
Cuarzo	20.4	Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g) = 83.12	Na^{+1} = 41.18 meq/100 g
Calcita	17.6		Ca^{+2} = 33.67 meq/100 g
Plagiclasa	6.3		Mg^{+2} = 7.38 meq/100 g
K- Feldespato	3.4		K^{+1} = 0.88 meq/100 g
Halita	1.0		
Minerales arcillosos	50.8		
Minerales arcillosos: Esmectita dioctahédrica, Material ilitico, ilita(0.6)/esmectita R 0, ilita(0.5)/esmectita R 1, ilita(0.75)/esmectita, clorita (0.9) – esmectita, clorita, odinita.			

Los resultados experimentales mostraron que la lutita reacciona con el agua perdiendo Mg. Cuando la reacción es con soluciones diluidas de K, Ca o Mg, estos cationes son transferidos de la lutita a las soluciones. Cuando las soluciones tienen un coeficiente de actividad menor de 0.97 los cationes son absorbidos por la lutita.

Sabemos que se presenta hinchamiento osmótico, debido a que la lutita en la pared del pozo está sometida a la acción del lodo de perforación y de la acción de los fluidos del poro [(22)], ver Fig. 3.44

Sobre la superficie de la esmectita actúan los factores indicados en la Fig. 3.45. Aplicando el modelo de la doble capa, a manera de desarrollar un primer modelo que permita estimar la presión osmótica de hinchamiento [22].



Fig, 3.44 Sistema Lodo de perforación – Lutita- Fluido de poro.

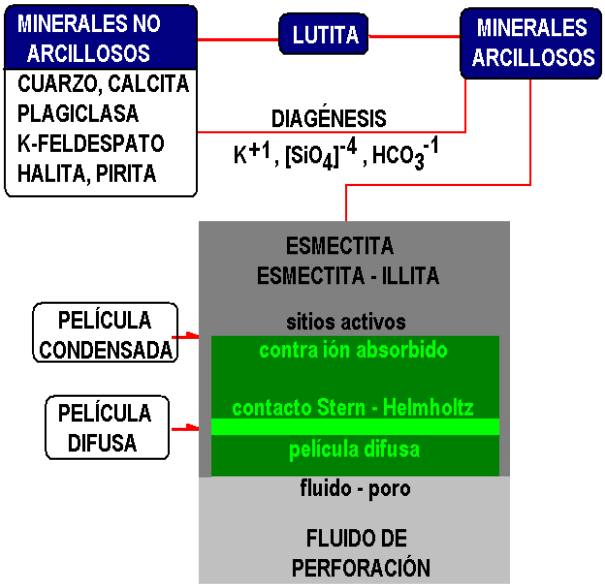


Fig. 3.45 Efectos del fluido de perforaciónsobre los minerales arcillosos

Un estudio mostró el efecto de la salinidad sobre la presión sobre la esmectita. Otro aspecto importante es el que al sustituir un catión en la estructura genera una nueva especie mineral. La lutita que reacciona a 80 °C con soluciones 0.0001M de Na, K, Ca o Mg, cuando el electrolito es K hay mayor formación de material ilitico, en el caso del Mg se forma clorita/esmectita, clorita y odinita. Es importante mencionar, que se requiere de muchas técnicas experimentales para cuantificar las variables de los modelos de estudio, por ejemplo mediante microscopia electrónica de barrido (MEB) se determina la composición puntual de la especie y este dato sirve para estimar la masa molecular del mineral en cuestión [23]. Por ejemplo la Fig. 3.46 esta una fotografía (MEB) de una clorita.

Fig. 3.46 En la parte central de esta fotografía (MEB), se observan placas arcillosas del tipo clorita, en este caso actuando como material cementante.

Determinación de los parámetros mecánicos básicos en lutitas, formación Carapita, oriente de Venezuela, mediante el uso del sistema TSI (TERRATEK STRENGTH INDEX) [24]

Otros estudios reportan la factibilidad de determinar indirectamente los valores de resistencia a la compresión en muestras de lutitas, mediante ensayos tipo Scratch en el sistema TSI. Esta metodología se ha utilizado en areniscas y consiste en someter al núcleo de roca al corte superficial con una cuchilla con desplazamiento horizontal a velocidad y profundidad constante. El uso de esta metodología en lutitas ha sido limitado, considerando la necesidad de preservar las muestras en baño de aceite mineral para evitar la pérdida de propiedades. Los resultados indican que los parámetros mecánicos estimados a partir de los ensayos con el sistema TSI, utilizando aceite mineral como fluido inhibitorio, resultaron ser muy parecidos a los resultados obtenidos de los ensayos de compresión no confinada y compresión triaxial. Adicionalmente, se observó que las muestras sometidas a la presencia de fluido base agua arrojaron valores de energía intrínseca y ángulo de fricción interna muy cercanos a los resultados obtenidos en las muestras sometidas a la presencia de aceite mineral.

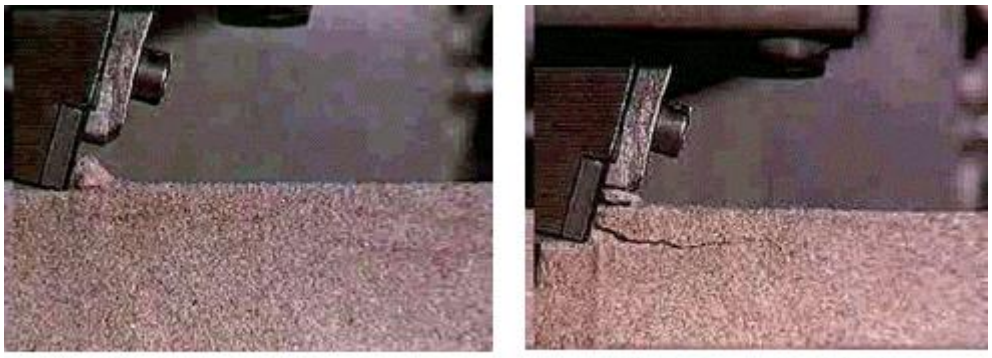
El principal problema de perforación asociado a lutitas es la inestabilidad del pozo, que puede ser producto de tres factores: físico-químicos, mecánicos y externos. Los factores físico-químicos están relacionados a la interacción de la lutita con el fluido de perforación, los factores mecánicos están asociados a esfuerzos y deformaciones de las rocas y los externos son los factores operacionales que pueden ser controlados durante la perforación.

Un aspecto importante asociado a la inestabilidad del pozo es la inadecuada o incompleta caracterización a escala de laboratorio, lo que conlleva a una inapropiada estrategia de perforación, afectando incluso, la adopción o masificación de nuevas tecnologías como pozos horizontales, pozos de alto ángulo, pozos extendidos, uso de barrenas de diamante policristalino, entre otros.

La caracterización geomecánica de lutitas consiste en determinar información sobre la rigidez y resistencia de la roca a través de ensayos sobre muestras preservadas y no perturbadas, con la finalidad de desarrollar modelos constitutivos realistas que permitan hacer diagnósticos apropiados sobre el desempeño de la roca bajo las condiciones de esfuerzo que se desarrollan alrededor del hoyo. Para ello es

posible utilizar el ensayo de rayado que permite estimar los valores de una forma económica en comparación con los ensayos de compresión, ya que requiere poco tiempo para la ejecución y análisis de resultados, y lo más importante, se pueden reutilizar las muestras para otros ensayos y determinar así otras propiedades.

Consiste en someter una muestra de roca al corte de una cuchilla a lo largo de su superficie con una velocidad constante. La fuerza de corte generada por la cuchilla tiene dos componentes (horizontal y vertical). La profundidad de corte “d” de la cuchilla puede ser ajustada y puede variar desde 0,1 mm hasta 0,4 mm. Para realizar el ensayo se utilizan dos tipos de cuchillas, una para determinar la energía intrínseca específica (equivalente a la resistencia a la compresión no confinada) y otra que permite determinar la energía específica (que relaciona la fricción) para determinar el ángulo de fricción interna de la roca. Durante el procedimiento de ensayo se pueden presentar dos tipos de corte: dúctil y frágil (ver Fig. 3.47). Estos tipos de corte dependerán de cuan profundo se realiza el corte, por ejemplo: para cortes pocos profundos el modo de corte es dúctil y para corte de mayores profundidades el modo de corte es frágil.



Modo de corte dúctil Modo de corte frágil

Fig. 3.47. Diferenciación entre los tipos de corte dúctil y frágil

La descomposición de las fuerzas en el corte afilado es simple ya que el corte se realiza con una cuchilla de ángulo recto permitiendo una sola superficie de corte, lo cual genera dos componentes de fuerzas Fch y Fcv. Con este tipo de cuchilla, la superficie se desplaza perendicularmente a la dirección del corte con un ángulo. La descomposición de las fuerzas durante el corte no afilado es más compleja debido a la intervención de una fuerza de fricción Ff producto de una superficie adicional de contacto. Esta fuerza de fricción se produce durante el corte ya que se utiliza una cuchilla con dos superficies de contacto. La Fig. 3,48 muestra un diagrama con los

dos tipos de cuchilla y la descomposición de las fuerzas actuante en una muestra de roca.

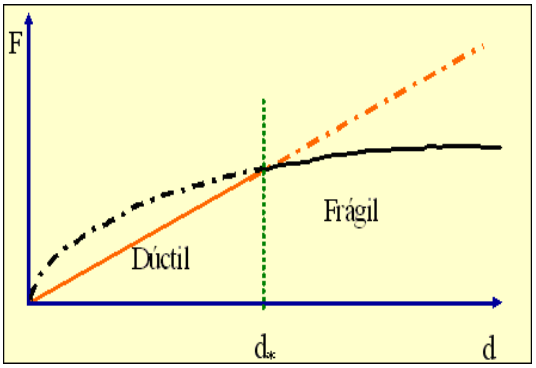


Fig. 3.48 Distribución de las fuerzas que actúan durante el corte.

Dos observaciones importantes de este estudio son, - el fluido utilizado durante los ensayos no parece tener una influencia determinante en los parámetros mecánicos ya que las muestras de lutitas sometidas a la presencia del fluido base agua, arrojaron valores de energía intrínseca muy cercanos a los valores de energía intrínseca específica obtenidas en las muestras sometidas a la presencia de aceite mineral, mientras que el ángulo de fricción interna se mantuvo constante, la segunda que los parámetros mecánicos obtenidos de los ensayos de rayado arrojaron valores muy similares a los obtenidos de los ensayos mecánicos, lo cuál pareciera confirmar la factibilidad de utilizar los ensayos de rayado en muestras de lutitas, de manera rápida y sencilla para complementar la información arrojada de los ensayos clásicos.

A medida que aumenta la complejidad de los pozos, los esfuerzos por encontrar mejores técnicas que satisfacen las demandas de un buen desempeño de las operaciones de perforación, se multiplican.

III.9 Registros geofísicos

Los registros de pozos son técnicas que se utilizan en pozos para la exploración y explotación petrolera. Sirven para determinar propiedades físicas in situ de las rocas. Dan un diagnóstico confiable de las condiciones de las rocas que están en el subsuelo [25].

III.9.1 Potencial espontáneo.

El potencial espontáneo es desarrollado dentro del pozo como resultado de la diferencia de salinidad entre el fluido del pozo y del agua de la formación. No

obstante, deberá haber también un cuerpo lutittico y una formación permeable para crear este potencial espontáneo.

El principal uso de la curva SP es para diferenciar estratos eléctricamente conductivos e impermeables, tal como lutitas, de estratos permeables. Puesto que la curva SP es un indicador de permeabilidad iónica, las deflexiones sobre la curva SP muestran que la permeabilidad puede no ser suficiente para la producción comercial. La magnitud de las deflexiones del SP es controlado por el contraste de resistividades entre el lodo de perforación y el agua de formación. De aquí que, si la resistividad del lodo es conocida, la resistividad del agua de formación también puede ser determinada.

Las capas permeables típicamente tienen su deflexión hacia la izquierda, mientras las capas impermeables se reflectan hacía la derecha. De aquí que, la máxima deflexión a la derecha usualmente es una indicación de lutitas, mientras una deflexión izquierda o negativa ocurre para las arenas y calizas porosas y permeables. La línea de las lutitas es la base desde la cual las deflexiones son medidas [(26)].

Componente Electroquímico del SP. Considérese una formación permeable con capas gruesas de lutitas arriba y abajo; supóngase también que los dos electrolitos presentes, filtrado de lodo y agua de formación intersticial, solo contienen cloruro de sodio (NaCl). Debido a la estructura laminar de la arcilla y a las cargas en las láminas, las lutitas son permeables a los cationes Na^+ pero impermeables a los aniones Cl^-. Solo los cationes Na^+ (cargas positivas) pueden moverse al través de la solución de NaCl mas concentrada a la menos concentrada. Este movimiento de iones cargados constituye una corriente eléctrica y la fuerza que causa que se muevan constituye un potencial al través de la lutita.

No hay una relación directa entre el valor de la permeabilidad y la magnitud de la deflexión de SP, ni la deflexión de SP tiene una relación directa con la porosidad.

El SP estático o SSP es la deflexión del SP frente a una formación limpia y gruesa. La deflexión se mide a partir de la línea base de las lutitas.

Corrimientos de la línea base de lutitas. La línea base de lutitas (a partir de la cual se miden las deflexiones del SP) por lo general esta bastante bien definida en el

registro del SP (Fig. 3.49). Sin embargo, en algunos pozos se observan cambios en la línea de base.

Estos cambios ocurren cuando una capa de lutitas, que no es una membrana catiónica perfecta, separa aguas de formación de diferentes salinidades. Los cambios grandes dificultan la definición de la línea base de lutitas y la determinación del valor SSP.

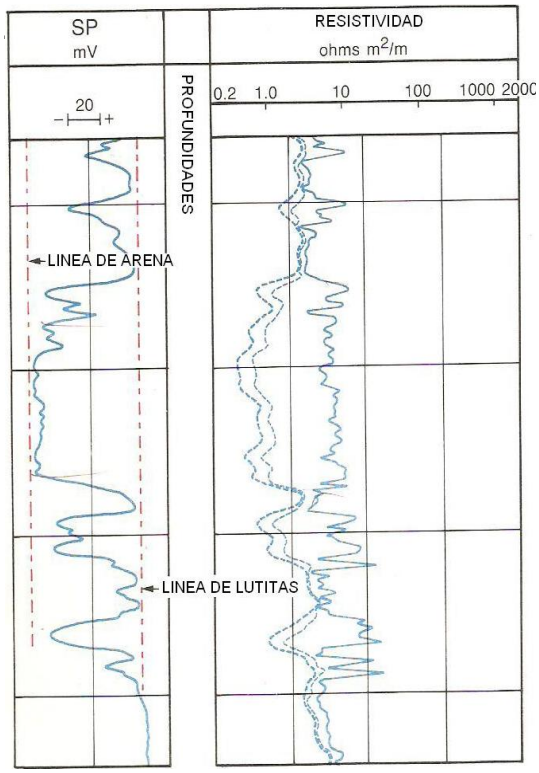


Fig. 3.49 Ejemplo de registro de SP en una serie de lutitas de arena

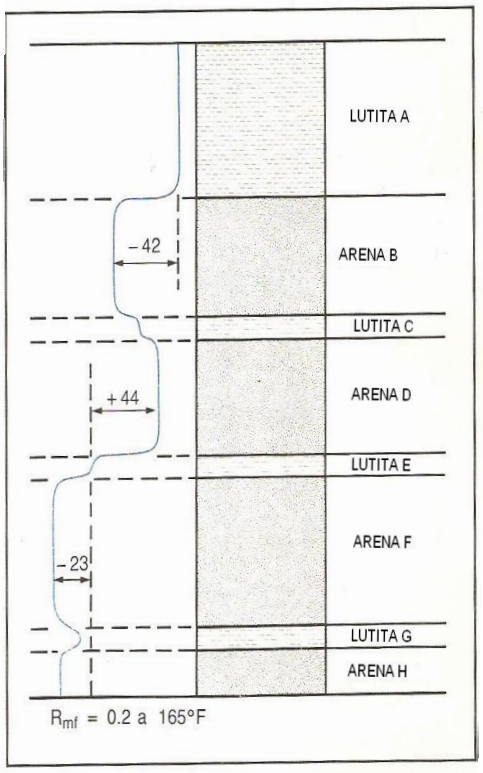


Fig. 3.50 Cambio en la línea de base de SP

La Fig. 3.50 muestra un caso de campo simplificado. El pozo penetra una serie de areniscas (B,D,F,H) que están separadas por lutitas delgadas o areniscas arcillosas (C,E,G). El SSP del intervalo B, por la deflexión en el limite superior, debe ser de -42mV. La lutita C no es una membrana catiónica perfecta y el SP enfrente de C no regresa a la línea de base de lutita de A. La deflexión de SP del intervalo D, medida desde la arcilla E, indica que es una mejor membrana que C. La línea base de lutitas para la arenisca D esta representada por la línea punteada en el extreme izquierdo; el SSP del intervalo D es de 44mV o mas. De manera similar, se puede observar que la lutita G no es tan buena membrana como la E; el SSP del intervalo F es negativo e igual a por lo menos -23mV.

Cuando no exista una capa arcillosa que separe las aguas de diferentes salinidades dentro de una capa permeable, también hay un cambio en la línea base

del SP. En este caso, la curva de SP muestra poca o ninguna variación en el nivel donde ocurre el cambio de salinidad, pero las deflexiones de SP en los límites superior e inferior de la capa permeable, muestran amplitudes bastante diferentes. De hecho, pueden presentar diferentes polaridades si la salinidad del filtrado de lodo esta entre las salinidades de dos diferentes aguas de formación intersticiales. Si la capa permeable no contiene arcilla y si esta capa y las lutitas que la rodean son lo suficientemente gruesas, las deflexiones de SP en los dos límites son las deflexiones del SP estático correspondientes a las dos distintas aguas.

En todos los casos, la deflexión del SP en el límite de la capa permeable de lutita da la polaridad de la deflexión del SP estático y, por lo general, un limite inferior de su magnitud.

III.9.2 Registro de GR.

El registro de rayos gamma mide la radioactividad natural de las rocas continuamente, es una técnica que puede determinar la litología de pozos entubados.

Los rayos gamma son emisiones de ondas electromagnéticas de alta energía las cuales son altamente penetrantes aun en materia densa. Son emitidas como resultado de la desintegración de elementos radioactivos junto con rayos alfa y beta [(27)].

En las formaciones sedimentarias el registro normalmente refleja el contenido de arcilla de las formaciones porque los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas. Las formaciones limpias generalmente tienen un nivel muy bajo de radioactividad.

El registro de GR puede ser corrido en pozos entubado lo que lo hace muy útil como una curva de correlación en operaciones de terminación o modificación de pozo. Con frecuencia se usa para complementar el registro del SP y como sustituto para la curva SP en pozos perforados con lodo salado, aire o lodos a base de aceite. En cada caso, es útil para la localización de capas con y sin arcilla y, lo más importante, para la correlación general.

Propiedades de los Rayos Gamma.

Los rayos gamma son impulsos de ondas electromagnéticos de alta energía que son emitidos espontáneamente por algunos elementos radioactivos.

Cada uno de estos elementos emite rayos gamma; el numero y energía de estos es distintivo de cada elemento.

Al pasar a través de la materia, los rayos gamma experimentan colisiones de Compton sucesivas con los átomos del material de la formación y pierden energía en cada colisión. Después de que el rayo gamma ha perdido suficiente energía, un átomo de la formación lo absorbe por medio de un efecto fotoeléctrico. Por consiguiente, los rayos gamma naturales se absorben gradualmente y sus energías se degradan (reducen) al pasar a través de la formación. La tasa de absorción varía con la densidad de la formación: dos formaciones que tengan la misma cantidad de material radioactivo por volumen de unidad, pero con diferentes densidades, mostraran diferentes niveles de radioactividad; las formaciones menos densas aparecerá algo las radioactivas.

La sonda de GR contiene un detector para medir la radiación gamma que se origina en el volumen de la formación cerca de la sonda.

La deflexión del registro de GR es función no sólo de la radioactividad y densidad de las formaciones sino también de las condiciones del agujero (diámetro, peso del lodo, tamaño y posición de la herramienta), ya que al material interpuesto entre el contador y la formación absorbe rayos gamma.

Aplicaciones

El registro de GR es particularmente útil para definir las capas arcillosas cuando el SP esta distorsionado (en formaciones muy resistivas), cuando el SP es insignificante (en formaciones que llevan agua dulce o en lodo salado; es decir cuando Rmf = Rw); o cuando el SP no se puede registrar (en lodo no conductivo, pozos vacíos o perforados con aire o en pozos revestidos).

El registro de GR refleja la proporción de arcilla y, en muchas regiones, se puede utilizar cuantitativamente como un indicador de la arcillosidad.

III.9.3 El registro NGS

Al igual que el registro de GR, el NGS o registro de espectrometría de rayos gamma naturales mide la radioactividad natural de las formaciones. A diferencia del registro de GR que solo mide la radioactividad total, este registro mide el numero de

rayos gamma y el nivel de energía de cada uno y permite determinar las concentraciones de potasio, torio y uranio radioactivos en la formación.

Principio Físico

La mayor parte de la radiación por rayos gamma en la tierra se origina por la desintegración de tres isótopos radioactivos: el potasio, el uranio y el torio.

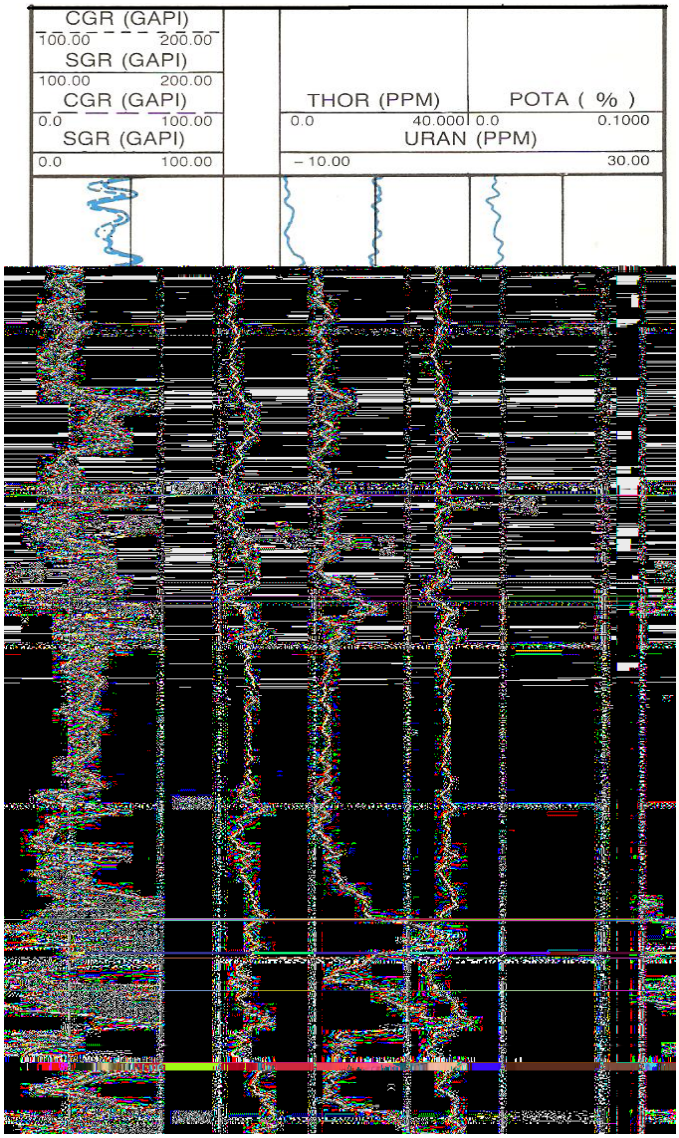
Como resultado, se emiten rayos gamma de muy diferentes energías y se obtienen espectros de energía bastante complejos. La herramienta NGS utiliza un detector de centelleo de yoduro de sodio contenido en una caja de presión que durante el registro se mantiene contra la pared del pozo por medio de un resorte inclinado.

El registro NGS proporciona un registro de las cantidades (concentraciones) de potasio, torio y uranio en la formación. Estos generalmente se presentan en las pistas 2 y 3 del registro (Fig. 3.51). Las concentraciones de torio y uranio se presentan en partes por millón (ppm) y la concentración de potasio en porcentajes (%).

Además de las concentraciones de los tres elementos radioactivos individuales, una curva de GR total (estándar) se registra y se presenta en la Pista 1. La respuesta total se determina por medio de una combinación lineal de las concentraciones de potasio, torio y uranio. Esta curva estándar se expresa en unidades API. Si se desea, también se puede proporcionar una medición "libre de uranio" (CGR) que solo es la suma de los rayos gamma del torio y del potasio.

El registro NGS se puede utilizar para detectar, identificar y evaluar minerales radioactivos y también para identificar el tipo de arcilla y calcular los volúmenes de arcilla. Esto, a su vez, puede proporcionar una perspectiva de la fuente, el medio ambiente del depósito, la historia diagenética y las características petrofísicas (área de la superficie, estructura de los poros, etc.) de la roca.

La respuesta del torio y el potasio o únicamente la respuesta del torio en el registro NGS, es frecuentemente mejor indicador de la presencia de arcilla que el registro de GR sencillo u otros indicadores de presencia de arcillas.



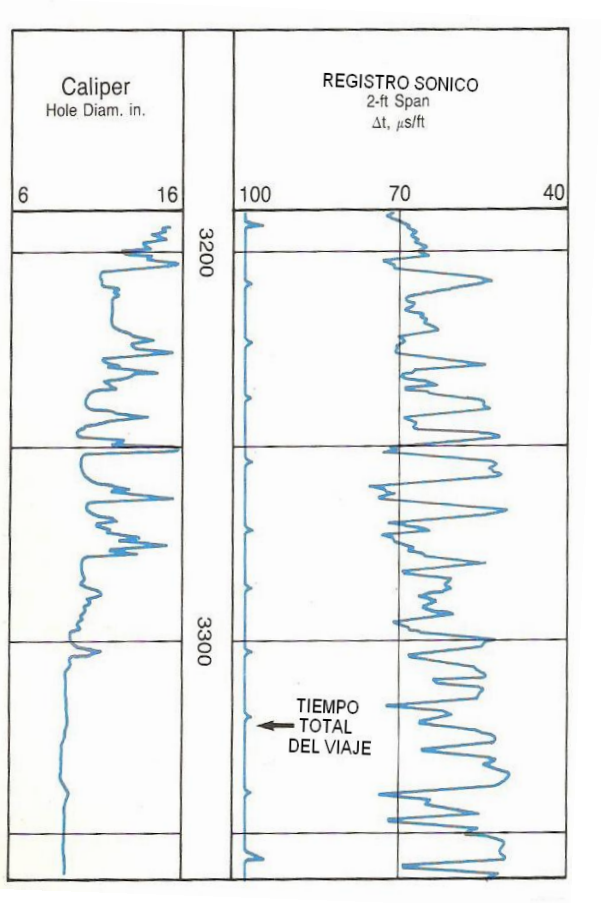


Fig. 3.51 Registro NGS de espectrometría de rayos gamma naturales

Fig. 3.52 Presentación del registro sónico

La combinación del registro NGS con otras mediciones sensibles a la litología (como absorción fotoeléctrica, densidad, neutrones, sónica) permite el análisis mineral volumétrico de mezclas litológicas muy complejas, permite que los minerales se identifiquen con mas certeza y los volúmenes se calculen con mayor precisión.

La respuesta del uranio del registro NGS a veces es útil como indicador de "fluido movido" para pozos perforados en yacimientos previamente explotados.

Asimismo, las capas permeables pueden tener un mayor contenido de sal de uranio que los intervalos menos permeables.

III.9.4 Registros sónicos

En su forma más sencilla, una herramienta sónica consiste de un transmisor que emite impulsos sónicos y un receptor que capta y registra los impulsos. El registro sónico es simplemente un registro en función del tiempo, t, que requiere una onda sonora para atravesar un pie de formación. Este es conocido como tiempo de transito, Δt; t es inverso de la velocidad de la onda sonora. El tiempo de transito para una formación determinada depende de su litología y su porosidad. Cuando se conoce la litología, esta dependencia de la porosidad hace que el registro sónico sea muy útil como registro de porosidad. Los tiempos de transito sónicos integrados también son útiles al interpretar registros sísmicos. El registro sónico puede correrse simultáneamente con otros servicios [28].

Presentación del Registro

Las velocidades sónicas en litologías de formaciones comunes fluctúan alrededor de 6000 a 23,000 pies/seg. Para evitar fracciones decimales pequeñas se registra el inverso de la velocidad t (en escala inglesa) en microsegundos por pie (μs/pie) como en un intervalo cerca de 44 /μs/pie para dolomita densa de porosidad cero a cerca de 190 /μs/pie para el agua.

El tiempo de transito por lo general se registra en una escala lineal en las Pistas 2 y 3 del registro (Fig. 3.50). El tiempo de viaje integrado se da por una serie de puntos que por lo general se registran en el extremo izquierdo de la Pista 2. Cada pequeño pico indica un aumento de 1 ms del tiempo total del viaje; cada 10 ms se registra un pico grande. El tiempo de viaje entre dos profundidades se obtiene simplemente contando los picos. El tiempo de viaje integrado es útil para propósitos sísmicos.

Velocidades Sónicas en las Formaciones

En formaciones sedimentarias, la velocidad del sonido depende de muchos parámetros; principalmente, depende del material de la matriz de roca (arenisca. caliza, dolomita...) y de la distribución de porosidad. En la Tabla 3.13 se presentan

los rangos de valores de la velocidad sónica y del tiempo de transito para matrices de rocas y revestimientos comunes.

Los valores mencionados son para sustancias no porosas. La porosidad disminuye la velocidad del sonido a través del material de la roca y al mismo tiempo aumenta el tiempo de transito.

Tabla 3.13 Tiempo de transito de algunas rocas

	V'ma (pie/seg)	Δt (μs/ pie)	Δt ma (μs/ pie) Usado comúnmente
Areniscas	18.000-19,500	55.5-51.0	55.5 o 51.0
Piedras Calizas	21.000-23,000	47.6	47.5
Dolomitas	23,000	43.5	43.5
Anhidritas	20.000	50.0	50.0
Sal	15.000	66.7	67.0
Revesti-Miento (hierro)	17.500	57.0	57.0

Presiones Anormales de Formación

Las formaciones que tienen presiones de fluido anormalmente altas, con frecuencia están sobre yacidas por arcillas sobre presionadas que tienen un exceso de agua en los poros. El tiempo de transito sónico es mayor en estas arcillas que en las que se compactan normalmente. Por lo tanto, puede emplearse un registro sónico para predecir la posibilidad de sobre presión.

Normalmente, el tiempo de transito sónico decrece en las arcillas al aumentar la profundidad. Un grafico de esta tendencia, tsh contra profundidad, define la compactación normal. Las desviaciones de esta tendencia hacia valores más altos

sugieren una sección anormal sobre presionada (Fig. 3.53). Si se tiene experiencia en el área, la magnitud de la sobre presión puede frecuentemente relacionarse con la diferencia entre el tiempo de transito real en la arcilla y el esperado de la línea de tendencia de compactación normal.

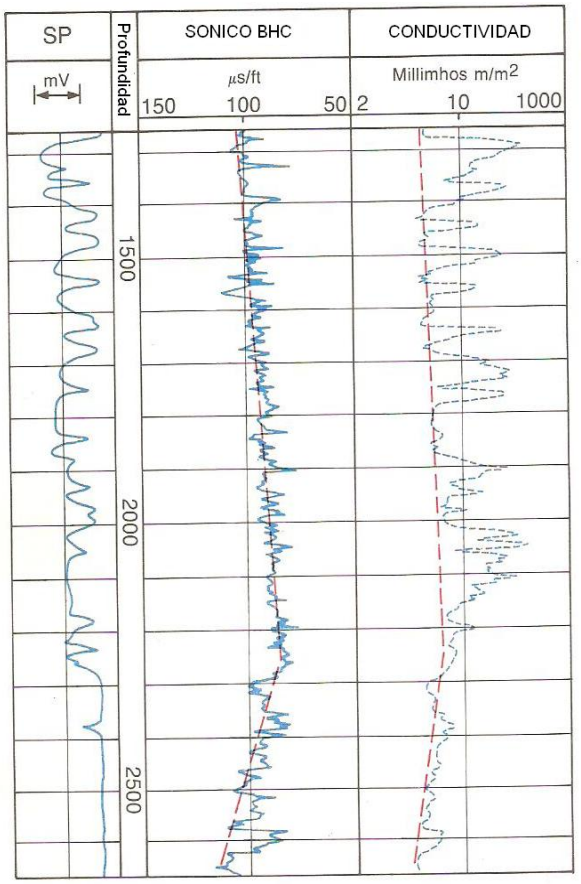


Fig. 3.53 Detección de una zona sobre presurizada con el registro sónico

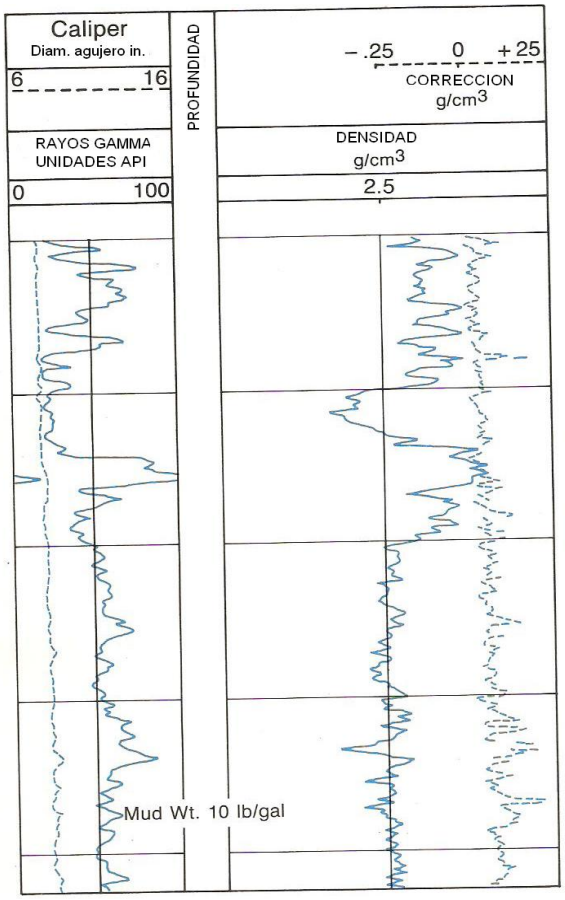


Fig. 3.54 Presentación del registro FDC

III.9.5 Registros de densidad

Los registros de densidad se usan principalmente como registros de porosidad. Otros usos incluyen identificación de minerales en depósitos de evaporitas, detección de gas, determinación de la densidad de hidrocarburos, evaluación de arenas con arcilla y de litologías complejas, determinación de producción de lutitas con contenido de aceite, calculo de presión de sobrecarga y propiedades mecánicas de las rocas.

Principio

Rayos gamma de alta energía son emitidos de una fuente química (usualmente cesio 137) e interactúa con los electrones de los elementos de la formación. Dos detectores en la herramienta cuentan el número de rayos gamma que regresan, los cuales son liberados a los electrones de la formación [(29)]. Se puede considerar a estos rayos gamma como partículas de alta velocidad que chocan con los electrones en la formación. Con cada choque, los rayos gamma pierden algo de su energía, aunque no toda, la ceden al electrón y continúan con energía disminuida. Esta clase de interacción se conoce como efecto Compton. Los rayos gamma dispersos que llegan al detector, que esta a una distancia fija de la fuente, se cuentan para indicar la densidad de la formación.

El numero de colisiones en el efecto Compton esta directamente relacionado con el número de electrones de la formación. En consecuencia, la respuesta de la herramienta de densidad esta determinada esencialmente por la densidad de los electrones (número de electrones por centímetro cúbico) de la formación. La densidad de los electrones esta relacionada con el volumen de densidad real ρb, que a su vez depende de la densidad del material de la matriz de la roca, la porosidad de la formación y la densidad de los fluidos que llenan los poros.

La información del registro se presenta como se muestra en la Fig. 3.52. La curva de densidad total, ρb, se registra en las pistas 2 y 3 con una escala de densidad lineal en gramos por centímetro cúbico.

El registro de densidad responde a la densidad de electrones (ρe) de las formaciones. El índice de densidad de electrones se relaciona con la densidad total:

ρe = ρb * 2 (Σ Z´s/ peso molecular), donde (Σ Z´s) es la suma de los números atómicos de los átomos que constituyen la molécula.

Efecto de Arcillas

La arcilla en las formaciones puede afectar la interpretación. Aunque las propiedades de las arcillas varían con la formación y la ubicación, las densidades típicas para capas y laminaciones arcillosas son del orden de 2.2 a 2.65 g/cm^3. Las densidades de la arcilla tienden a ser menores a pocas profundidades donde las fuerzas compactantes no son tan grandes. La arcilla o lutitas diseminadas en los espacios porosos pueden tener una densidad algo menor que las capas de arcillas.

Efecto de Presión

La densidad total de la arcilla aumenta con la compactación y en áreas donde los sedimentos son relativamente jóvenes, el aumento en la densidad de la arcilla con la profundidad se hace aparente en los registros. Sin embargo, se observan desviaciones a esta tendencia en zonas sobre presionadas; la densidad de la arcilla disminuye al aumentar la profundidad (Fig. 3.55). Esta disminución aparece con frecuencia en arcillas a varios cientos de metros arriba de arenas permeables de alta presión. Una zona de alta densidad (barrera sello) por lo general se encuentra en la parte superior de este intervalo de densidad disminuida. Se pueden utilizar registros de densidad, que se corrieron a intervalos durante la perforación del pozo, para predecir zonas de presión anormal a fin de poder tomar precauciones para eliminar posibles riesgos.

III.9.6 Registro Litho-Densidad

El registro Litho-Densidad es una versión mejorada y aumentada del registro FDC. Además de la medición de densidad total, la herramienta también mide el factor fotoeléctrico de la formación Pe.

Tabla 3.14 Densidades para algunas rocas

Compuesto	Fórmula	Densidad Real ρ_b	$\frac{2\Sigma Z's}{\text{Peso Molec.}}$	ρ_e	ρ_e (como lo capta la herramienta)
Cuarzo	SiO_2	2.654	0.9985	2.650	2.648
Calcita	$CaCO_3$	2.710	0.9991	2.708	2.710
Dolomita	$CaCO_3MgCO_3$	2.870	0.9977	2.863	2.876
Anhidrita	$CaSO_4$	2.960	0.9990	2.957	2.977
Silvita	KCl	1.984	0.9657	1.916	1.863
Halita	NaCl	2.165	0.9581	2.074	2.032
Yeso	$CaSO_42H_2O$	2.320	1.0222	2.372	2.351
Carbón		1.400	1.0300	1.442	1.355
Antracita		1.800	1.0300	1.852	1.796
Carbón		1.200	1.0600	1.272	1.173
Bituminoso		1.500	1.0600	1.590	1.514
Agua Dulce	H_2O	1.000	1.1101	1.110	1.000
Agua Salada	200,000 ppm	1.146	1.0797	1.237	1.135
Aceite	$n(CH_2)$	0.850	1.1407	0.970	0.850
Metano	CH_4	ρ_{meth}	1.2470	$1.247\rho_{meth}$	$1.335\rho_{meth}$-0.188
Gas	$C_{1.1}H_{4.2}$	ρ_g	1.238	$1.238\rho_g$	$1.325\rho_g$-0.188

El factor fotoeléctrico puede relacionarse con la litología; mientras que la medición ρb, responde principalmente a la porosidad y de manera secundaria a la matriz de la roca y al fluido en los poros, la medición Pe responde principalmente a la

matriz de la roca (litología) y de manera secundaria a la porosidad y al fluido de los poros.

La Tabla 3.14 da el valor de Pe para varias rocas, minerales y fluidos de yacimientos que comúnmente se encuentran en un campo petrolero.

III.9.7 Registros neutrónicos

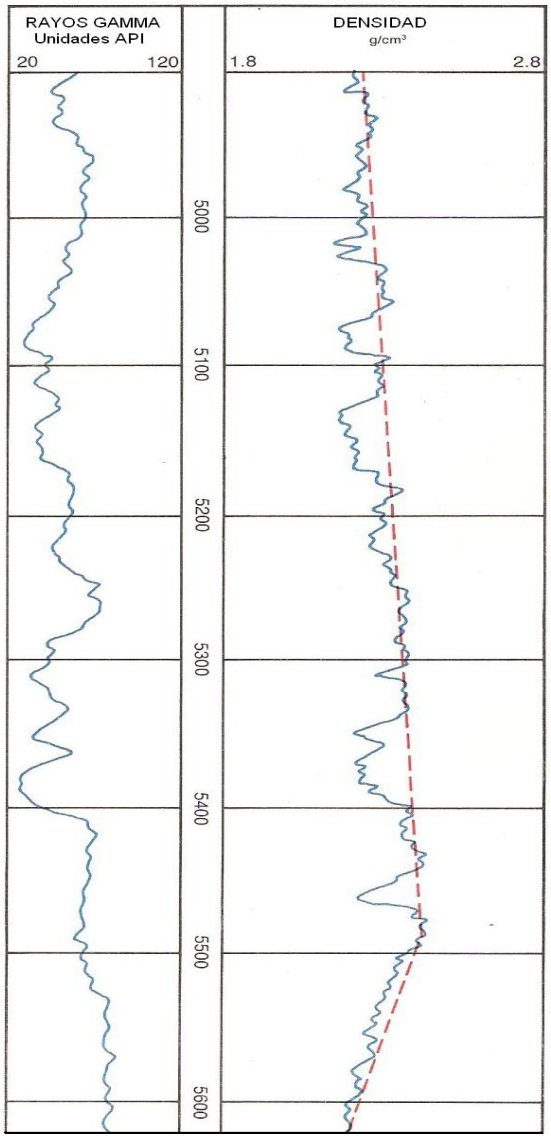
Los registros neutrónicos se utilizan principalmente para delinear formaciones porosas y para determinar su porosidad. Responden principalmente a la cantidad de hidrogeno en la formación. Por lo tanto, en formaciones limpias cuyos poros estén saturados con agua o aceite, el registro de neutrones refleja la cantidad de porosidad saturada de fluido.

Las zonas de gas con frecuencia pueden identificarse al comparar el registro de neutrones con otro registro de porosidad o con un análisis de muestras. Una combinación del registro de neutrones con uno o más registros de porosidad proporciona valores de porosidad e identificación de litología aun más exactos, incluso una evaluación del contenido de arcilla.

El equipo SNP está diseñado para operarse sólo en agujeros abiertos, vacíos o llenos de líquido. La herramienta es sensible a la arcilla de la formación ya que esta generalmente contiene pequeñas cantidades de boro y de otros elementos raros que tienen secciones transversales de captura de neutrones térmicos particularmente altas. Este efecto, si es excesivo, puede ocultar la respuesta de la herramienta al gas en formaciones con arcillas.

Para optimizar la respuesta al gas y mejorar la interpretación en la presencia de elementos absorbentes de neutrones térmicos, la herramienta de Doble Porosidad incorpora dos detectores de neutrones termales epitermales además de los detectores de neutrones termales. Se obtienen dos mediciones de porosidad por separado, una de cada par de detectores. En formaciones térmicas las porosidades medidas generalmente concuerdan. En formaciones con arcillas que contengan un gran número de elementos absorbentes de neutrones termales, la porosidad que miden los detectores epitermales tienen un valor mas bajo y concuerda de manera más cercana con la porosidad derivada de la densidad. La comparación de las dos mediciones de porosidad indica el contenido de arcilla o la salinidad del fluido de la formación.

Las lecturas de porosidad en el SNP se calculan y graban directamente en el registro (Fig. 3.55).



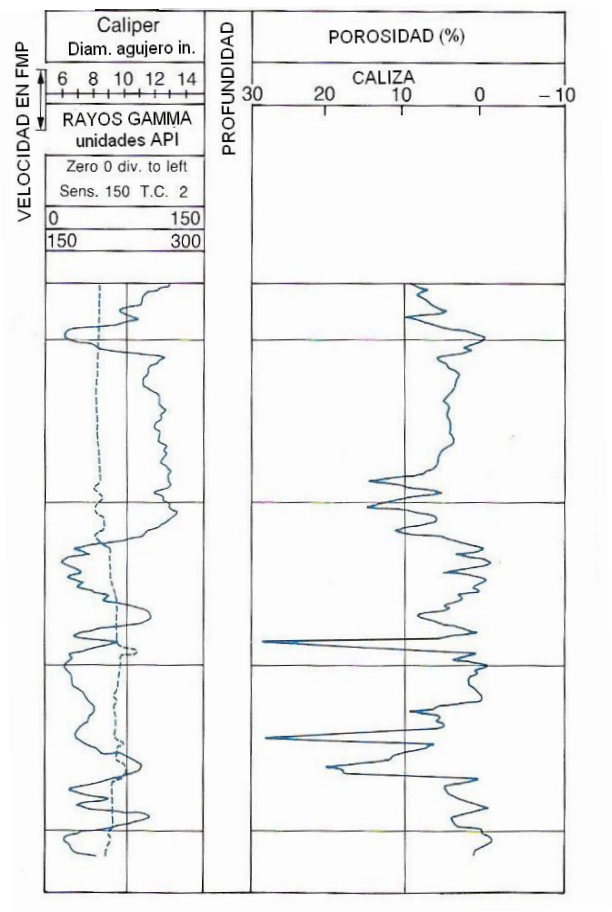


Fig. 3.55 Registro de densidad en lutitas sobre presurizadas

Fig. 3.56 Presentación del registro SNP

Los registros CNL y de Doble Porosidad se graban en unidades lineales de porosidad para una matriz de litología en particular. Cuando una herramienta CNL se corre en combinación con otra herramienta de porosidad, todas las curvas pueden registrarse en la misma escala de porosidad. Esta superposición permite una interpretación visual cualitativa de la porosidad y la litología en presencia de gas. La Fig. 3.57 es un ejemplo de la combinación de un registro CNL-FDC.

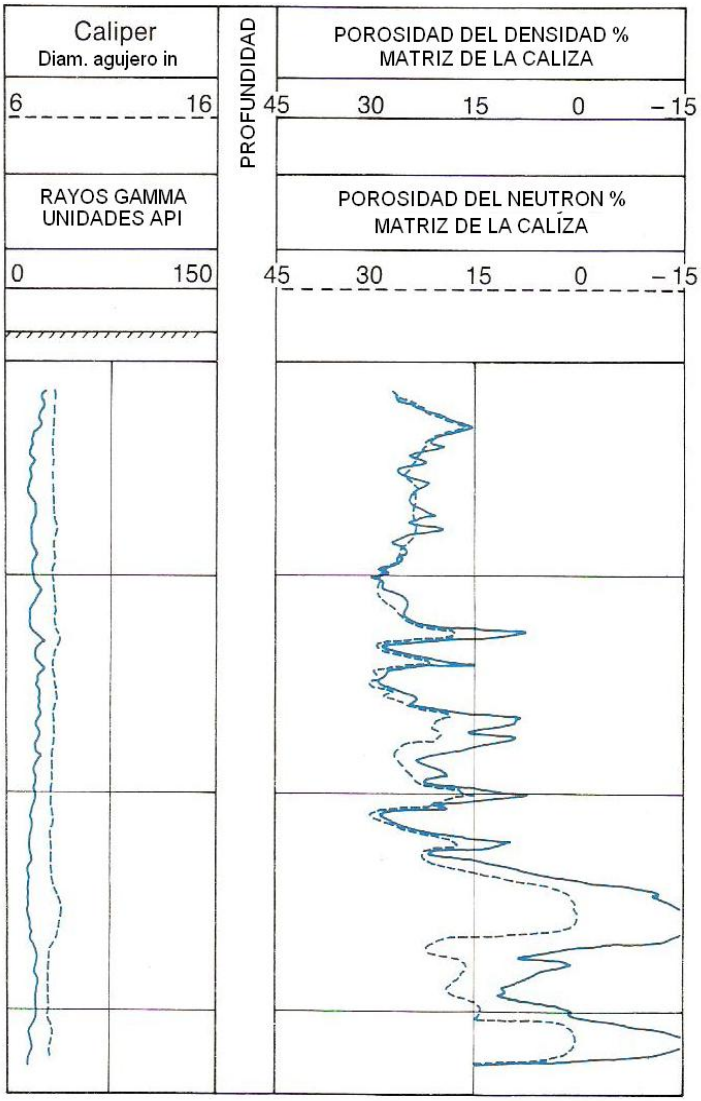


Fig. 3.57 Presentación del registro CNL-FDC

Arcillas, Agua Ligada

Las herramientas de neutrones "ven" todo el hidrogeno en la formación aún cuando alguno no este asociado con el agua que satura la porosidad de la formación. Por ejemplo, "ve" el agua ligada asociada con las arcillas que por lo general tienen un índice de hidrogeno apreciable; en las formaciones con arcilla, la porosidad aparente derivada de la respuesta de la herramienta de neutrones será mayor que la porosidad efectiva real de la roca del yacimiento.

Efecto de Litología

Las lecturas de todos los registros de neutrones se ven afectadas hasta cierto punto por la litología en la matriz de la roca. Los registros SNP y CNL por lo general tienen una escala para una matriz de caliza.

Aplicaciones

La determinación de la porosidad es uno de los usos más importantes de los registros de neutrones. Para determinaciones exactas de porosidad, son necesarias correcciones para litología y parámetros del agujero.

El registro SNP esta específicamente diseñado para agujeros abiertos y proporciona lecturas de porosidad con un mínimo efecto de agujero. También puede usarse eficientemente en agujeros llenos de gas.

III.10 Sísmica de pozo

En las etapas iniciales de planeación de la exploración y del desarrollo en una nueva área, se usan ampliamente exploraciones sísmicas superficiales para delinear las trampas estructurales o estratigráficas. Mejoras recientes en las técnicas de filtrado y procesamiento digitales han conducidlo a resultados de alta calidad en condiciones favorables. La resolución de las exploraciones sísmicas superficiales, sin embargo, sigue siendo fundamentalmente limitada debido a las bajas frecuencias de operación [(28)].

Al iniciar la perforación, existen oportunidades para mejorar esta situación a través del uso de registros de pozo. Después de corregir y calibrar contra disparos de verificación, los registros sonidos y de densidad pueden utilizarse para generar sismogramas sintéticos, los cuales son extremadamente valiosos para verificar las reflexiones en una sección sísmica y relacionar las características sísmicas con estructuras geológicas. Las anomalías o inversiones de velocidad pueden verificarse para no provocar una perforación fuera de la estructura de los pozos de exploración.

Una aplicación geofísica reciente de los registros de servicio de cable implica la preparación de un Perfil Sísmico Vertical (VSP). En esta técnica, un cañon de aire u otra fuente sísmica en la superficie genera la señal de entrada que un geófono de pozo detecta. Ya que la energía sonora viaja solo una vez a través de las capas superficiales intemperizadas, el perfil resultante tiene una resolución mucho mejor que la sísmica superficial alrededor del agujero y, en casos favorables, pueden identificar reflectores ubicados muy por debajo de la profundidad máxima del pozo.

III.11 Medición mientras se perfora

La medición mientras se perfora o MWD (Measure While Drilling). Es un equipo que mide parámetros en el fondo del pozo y después los transmite a la superficie, resultando en una mejora de la perforación [30,31]. Esta herramienta ha incrementado la confianza en los usuarios en muchas operaciones de perforación, esta herramienta es una alternativa viable en vez de usar líneas de cable [32].

Estas herramientas de medición surgieron primordialmente para pozos direccionales, donde se deseaba disminuir el tiempo no productivo de equipo al esperar que se corriera registro de posición con cable. Llamados Single Shot, este registro solo podía medir la posición en un solo punto y después si era necesario tomar mas lecturas debía extraerse la herramienta cambiar y volver a correr, es decir varios viajes de registro para tomar varias posiciones. Debido al bajo costo que representa obtener muchas mediciones en vez de una, el MWD gano gran popularidad.

Después se incluyeron los registros geofísicos, los registros mientras se perfora o LWD (Logging While Drilling), los cuales no tenían la calidad que ostentan los clásicos registros con cable, pero con el paso del tiempo han mejorado y en muchas ocasiones solo se ocupa el sistema LWD para obtener registros, debido a la geometría del pozo.

III.11.1 Herramienta MWD

Actualmente son muchos los parámetros medidos mientras se perfora. El termino MWD es usando de manera común para referirse a las lecturas tomadas en el fondo del pozo con un instrumento electromagnético dentro de un drill collar no magnético en el ensamble de fondo (BHA). La capacidad para enviar los datos adquiridos hacia la superficie en tiempo real usualmente se incluye en la definición de MWD. Los métodos telemétricos de envío de datos tienen mayor dificultad para transportar la gran cantidad de información generada, por ello dentro de la definición de MWD, también debe incluirse las herramientas que almacenan los datos en una memoria física y es después recuperada para leerse en superficie. La figura 3.58 muestra la herramienta MWD

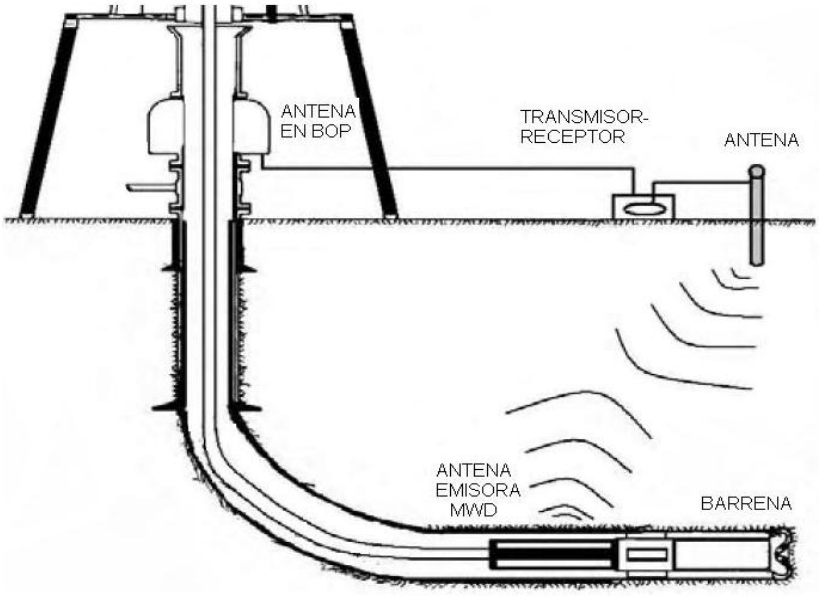


Fig. 3.58 Herramienta MWD

Las herramienta MWD puede medir [33] la presión, temperatura, peso de la barrena, longitud medida, inclinación y azimut, esfuerzos axiales en la tubería, gasto de lodo, calibración del agujero. En realidad son muchos parámetros que pueden ser medidos por esta herramienta, y el uso de cada uno esta en virtud de la disponibilidad y la necesidad de aplicación.

III.11.2 Herramienta LWD

LWD es el término genérico para aquellos dispositivos que miden las propiedades de la roca. Antes solo los registros con cable median dichas propiedades [34]. Pero los adelantos tecnológicos han permitido prescindir muchas veces de los registros con cable.

La forma en la cual opera el LWD es muy similar en componentes al MWD, la diferencia esta en lo que mide.

El primer registro LWD comercial fue hecho en 1980 [35]. La función principal del sistema LWD, es caracterizar la roca mientras se avanza a través de ella. La ventaja de esto, es obtener registros antes que la roca sea invadida por el fluido de perforación. También esta involucrada la toma de decisiones en tiempo real, es decir, la corrección de la trayectoria basándose en la información obtenida por los registros. Se puede saber que se llego a la zona objetivo sin tener que esperar a

correr registros con cable, lo cual minimiza el tiempo de exposición de la roca, y evitando los diversos problemas causados por la sobre exposición de la roca el fluido de perforación.

Es conocido que muchas veces la información geológica disponible es a través de correlaciones o sísmica, esta información no es tan exacta como se quisiera, siempre existe un nivel de incertidumbre respecto a la ubicación de las zonas de interés. Las herramientas LWD ayudan a actualizar esta información complementándola con los datos obtenidos a medida que avanza la perforación.

Los principales registros que están disponibles son [36]: Resistividad, Rayos gamma, Densidad neutrón, Sónico. La figura 3.59 muestra la herramienta LWD.

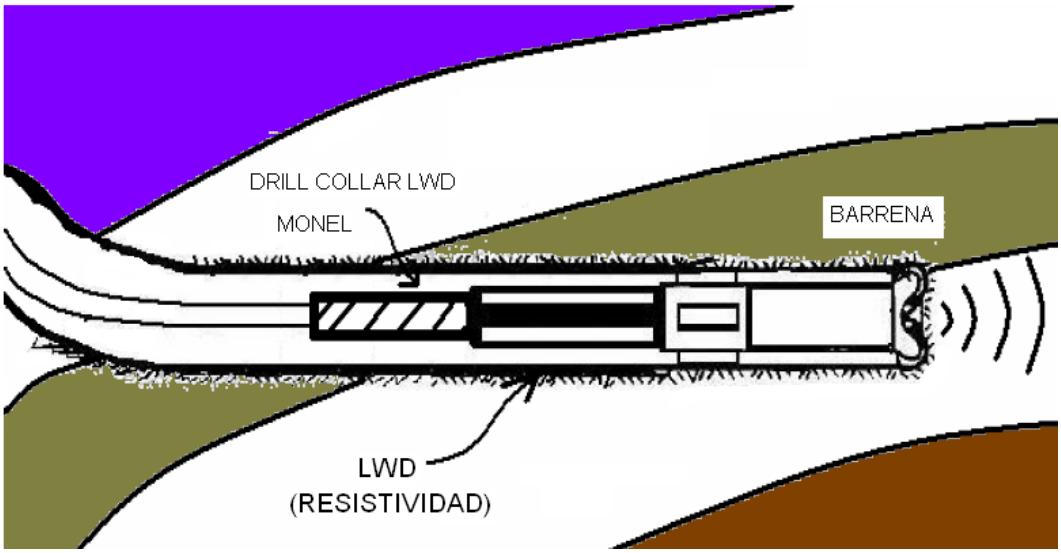


Fig. 3.59 Herramienta LWD

La trayectoria de un pozo direccional puede ser descrita en términos de su inclinación, profundidad medida y azimut. La herramienta llamada survey o de geoposición, proporciona la inclinación y azimut del pozo en cierto punto de la trayectoria. Las mediciones se realizan por estaciones, debido a eso al final se obtiene una discretización de la trayectoria. Con estos puntos y algún métodonumérico de los muchos existentes se traza la trayectoria real del pozo.

III.11.3 secciones estructurales.

La figura 3.60 muestra la estratigrafía del campo Cantarell, la figura 3.61 muestra la estratigrafía del campo Chicontepec y la figura 3.62 la de Muspac [37].

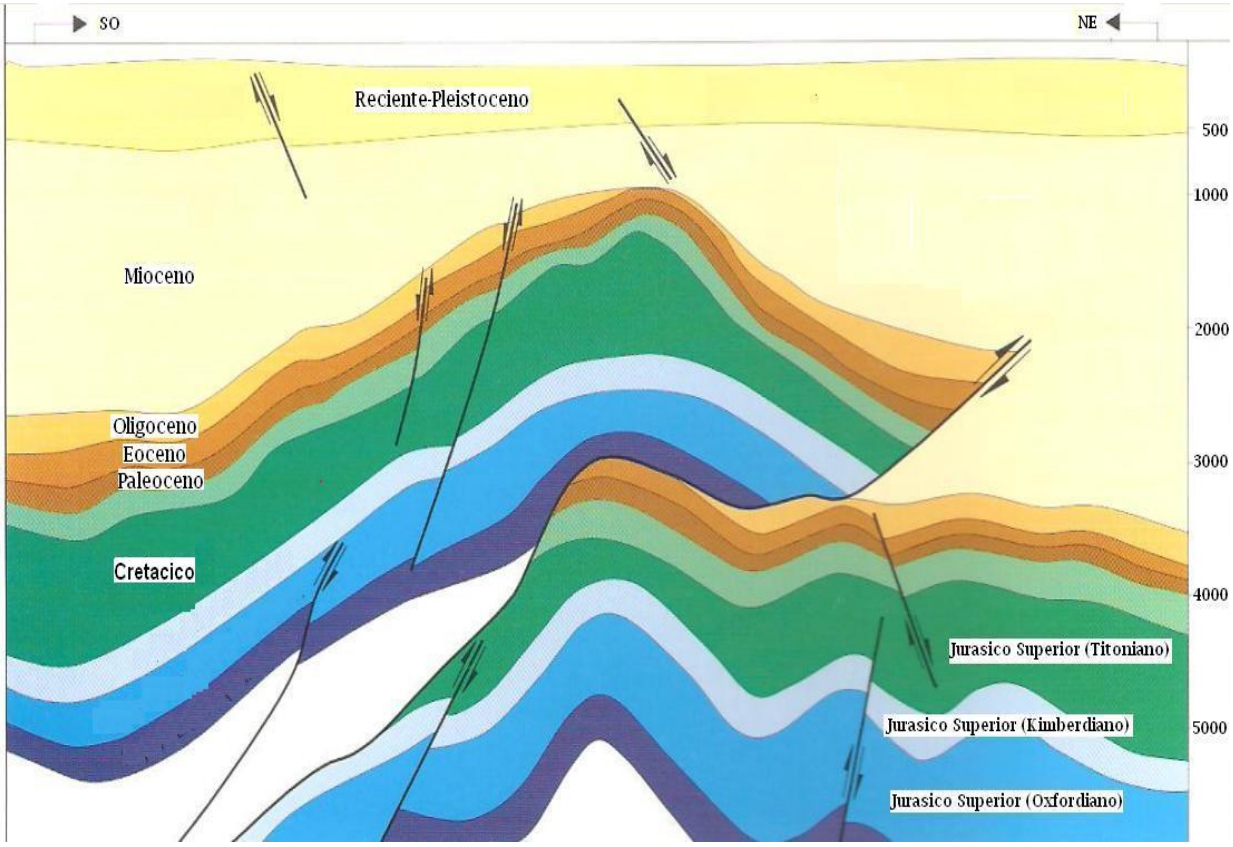


Fig. 3.60 Sección estructural de Cantarell

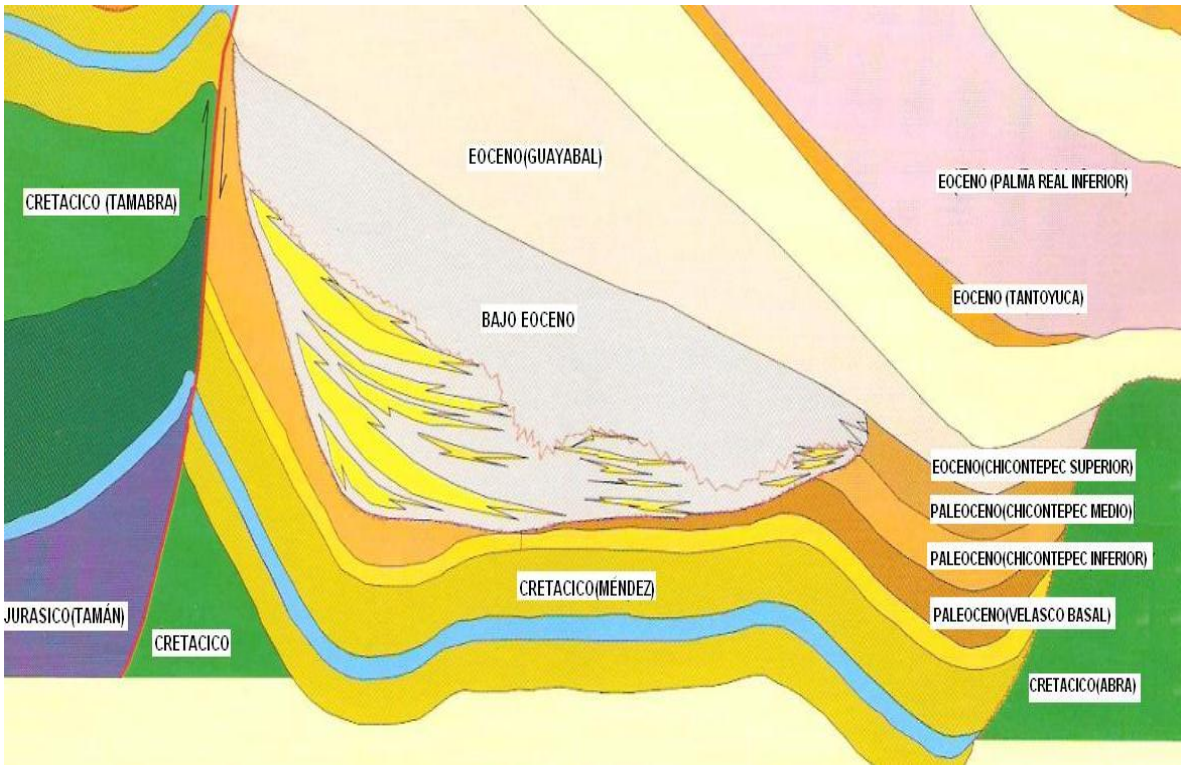


Fig. 3.61 Sección transversal del Paleocanal de Chicontepec. Las arenas tienen una limitada continuidad lateral

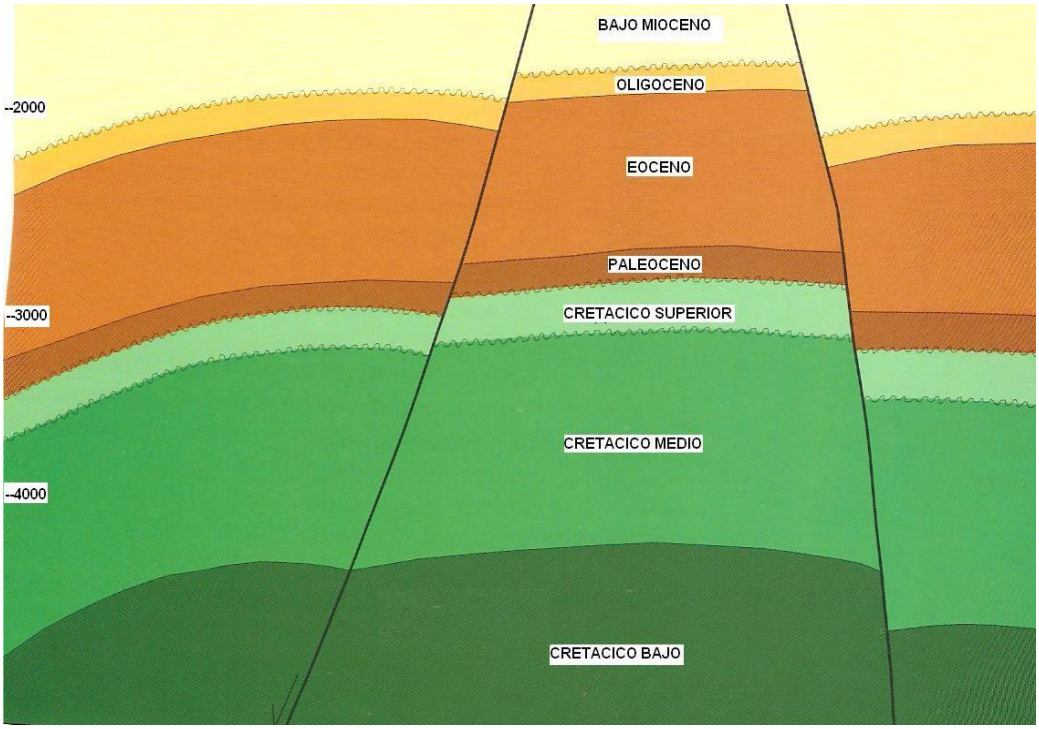


Fig. 3.62 Típica sección estructural del campo Muspac,

indicando los principales horizontes.

El campo Cantarell es el mas importante campo productor en México, el segundo en reservas totales después del Paleocanal de Chicontepec y el número uno en reservas probadas, debido a su magnitud es el octavo mas grande campo en el mundo.

El Paleocanal de Chicontepec tiene aproximadamente 25% de las reservas totales del país y 85% de las reservas de la región norte la calidad de los aceites varía de 18 a 45 ºAPI.

Muspac es el más importante productor de gas de la región sur y el tercero mas importe en el país después de Akal y de Caan [(37)].

La figura 3.63 muestra la columna geológica del campo Cantarell, la figura 3.64 la columna del campo Muspac y la columna del Paleocanal de Chicontepec.

A continuación se presenta una caracterización de las rocas perforadas en la edad terciaria del Campo Cantarell [(38)].

Se describen las unidades cronoestratigráficas presentes en el área de estudio de las más jóvenes a las más viejas.

PLIO-PLEISTOCENO. Consiste de lutitas color verde bentoniticas, con un espesor promedio de 650 m.

MIOCENO: Es una alternancia de lutitas bentóniticas color verde y limolitas a arenas siliciclasticas de gran fino, color gris claro a verde claro, presentan un espesor promedio de 1000 m.

OLIGOCENO. Consiste de lutitas bentonititas, color verde, con un espesor promedio de 350 m.

EOCENO SUPERIOR: Lutita color gris claro y gris verdoso bentonítico, con espesor promedio de 20 a 80 m.

EOCENO MEDIO: En la parte superior esta constituido por una lutita gris claro a gris verdoso, bentonitica, ligeramente calcárea. En la parte media consiste de packstone-grainstone color crema, constituido por granos de bioclastos, intraclastos y ooides de 100 micras a 7 mm hasta 2 cm de tamaño. Se presenta en la parte sur del campo y tiene una distribución E-W, cambiando a facies arcillosas en los pozos de la parte norte del campo. Su espesor varía de 20 a 120 in. EOCENO INFERIOR: En la parte superior consiste de lutita gris claro a gris verdoso, bentonitica, ligeramente calcárea. En la parte interior, consiste de packstone color pardo, constituido por granos redondeados a subredondeados de exoclastos, bioclastos y ooides de 100 a 500 micras de tamaño, bien clasificados, diseminados en matriz micritica moderadamente recristalizada, con intercalaciones de lutita bentonitita y calcárea color verde de estructura laminar.

Se presenta en la parte norte del campo en la dirección SE. El espesor varía de 10 a 140 m.

PALEOCENO SUPERIOR: En la parte superior consiste de packstone color pardo, constituido por granos redondeados a subredondeados de exoclastos, bioclastos y ooides de 100 a 500 micras de tamaño, bien clasificados, diseminados en matriz micritica moderadamente recristalizada, con intercalaciones de lutita bentonítica y calcárea color verde de estructura laminar. Se presenta en la parte norte del campo en una dirección NW-SE. La parte inferior consiste de lutita gris verdoso en ocasiones pardo rojizo, bentonítica y calcárea; en ocasiones mudstone arcilloso color gris verdoso de estructura laminar.

PALEOCENO INFERIOR: Consiste de lutita gris verdoso, pardo rojizo, bentonítico y calcárea, en ocasiones mudstone arcilloso color gris verdoso de estructura laminar. Presenta un espesor de 40 a 60 m.

BRECHA CALCAREA: Constituida por clastos subangulosos a subredondeados cuyo tamaño varía de 0.2 a 15 cm de dolomía y en menor proporción mudstone-wackstone de bioclastos e intraclastos color crema, pardo gris. Su espesor varía de 200 a 300 m y subyace discordantemente al Paleoceno y sobreyace al Cretácico Superior.

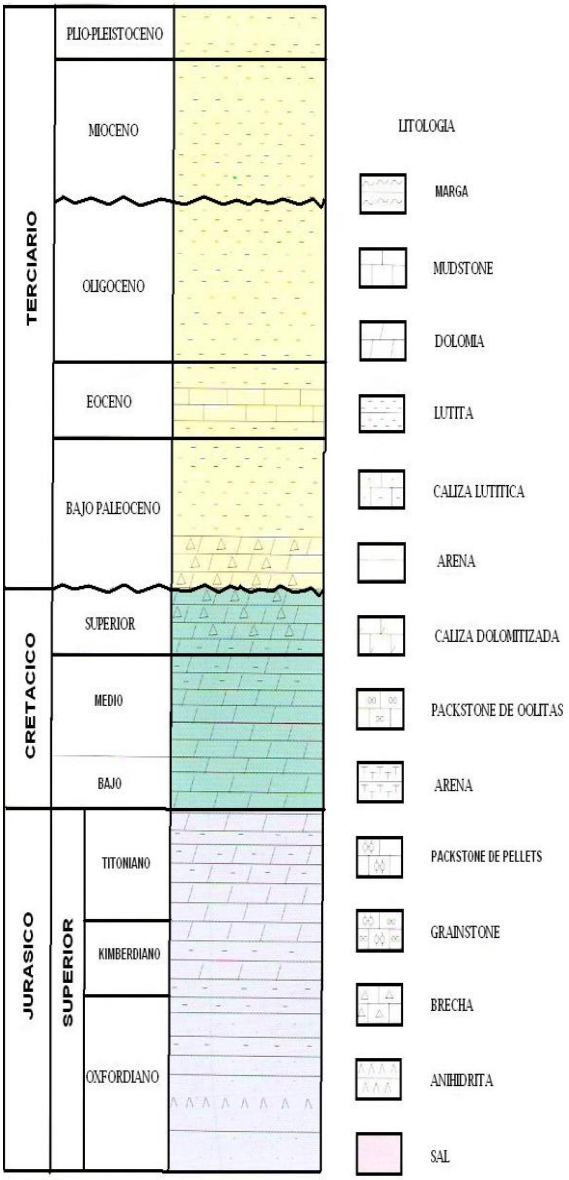


Fig. 3.63 Columna geológica del Campo Cantarell

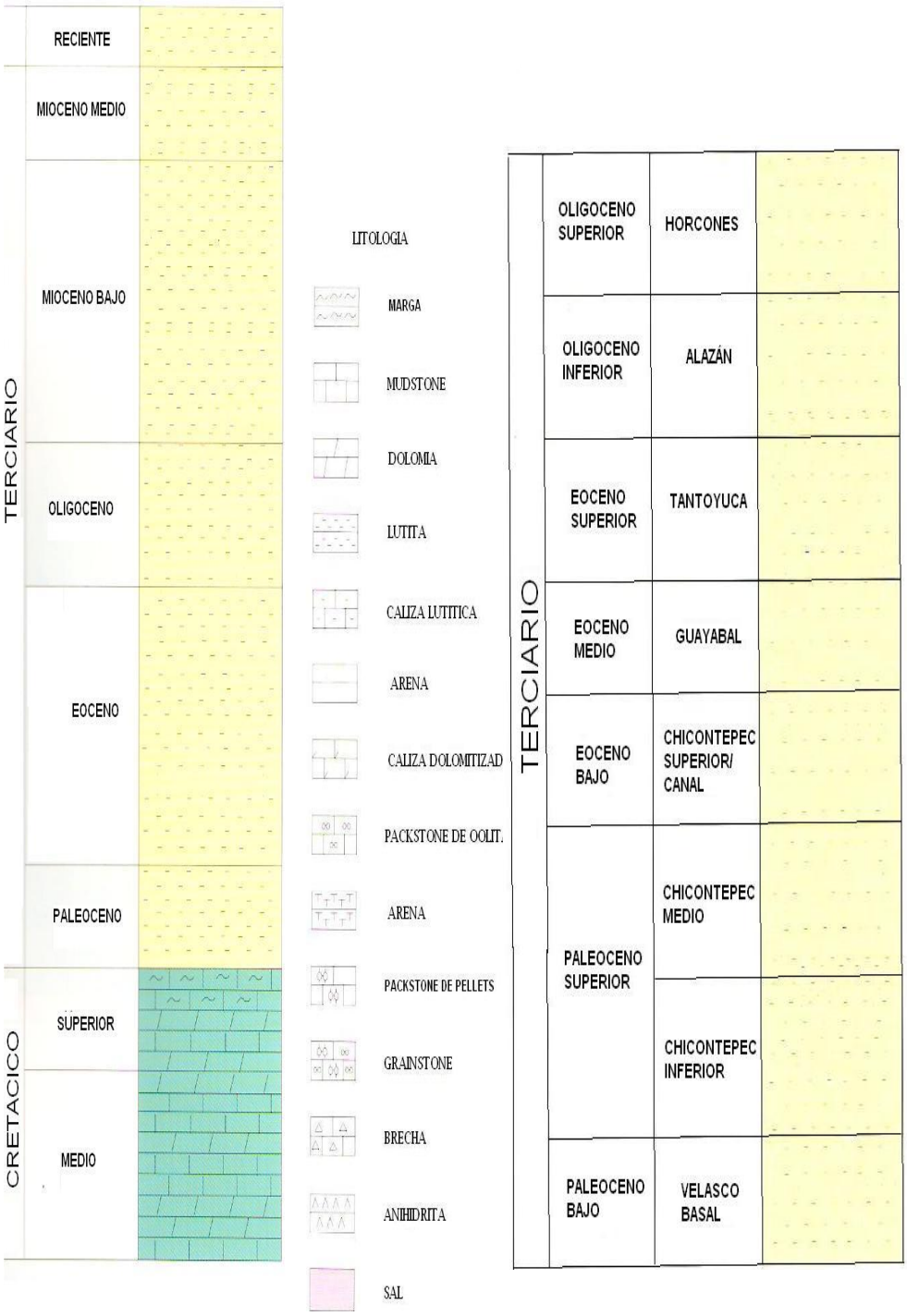


Fig. 3.64 Columna geológica del Campo Muspac y del Paleocanal de Chicontepec

En seguida se describe la columna geológica de la Cuenca de Burgos [39].

Terciario

A fines del Cretácico y principios del Terciario se establece en el área que hoy ocupa la Cuenca de Burgos, una extensa plataforma de bajo relieve con inclinación hacia el oriente, dando lugar a una gran variedad de ambientes, que desarrollan potentes espesores de arenas y arcillas del Paleoceno al Reciente.

Paleoceno

Durante el Paleoceno Temprano una transgresión marina marca el inicio de una sedimentación fina, dando lugar a depósitos arcillo-arenosos de ambientes de plataforma media-externa a batial superior con desarrollos de areniscas turbiditicas que corresponden a la Formación Midway.

Para el Paleoceno Tardío un evento regresivo, producto de una caída del nivel del mar, así como el ajuste regional del depocentro del Río Houston, da lugar al incremento de cuerpos arenosos dentro de una secuencia arcillo-arenosa que constituye a la Formación Wilcox.

Paleoceno Midway

La formación Midway está constituida por lutita gris oscuro, semidura, arenosa, calcárea, presenta alternaciones de areniscas gris claro y gris oscuro, de granos finos de cuarzo, subredondeados, regularmente clasificados, semicompacta, en matriz arcillosa y cementante calcáreo.

Paleoceno Wilcox

La formación Paleoceno Wilcox está constituida por una secuencia de lutita gris oscuro, semidura arenosa y calcárea, con alternancia de areniscas gris claro y gris claro, de granos finos de cuarzo, subredondeados, regularmente clasificados, semicompactados en matriz arcillosa y cementante calcáreo, ésta secuencia se encuentra depositada concordantemente sobre la secuencia areno-arcillosa del Paleoceno Wilcox.

Las arenas encontradas en esta secuencia son de mejor calidad en cuanto a su granulometría y poca arcilla. La figura 3.65 y 3.66 muestran la columna geológica de Burgos [(39)].

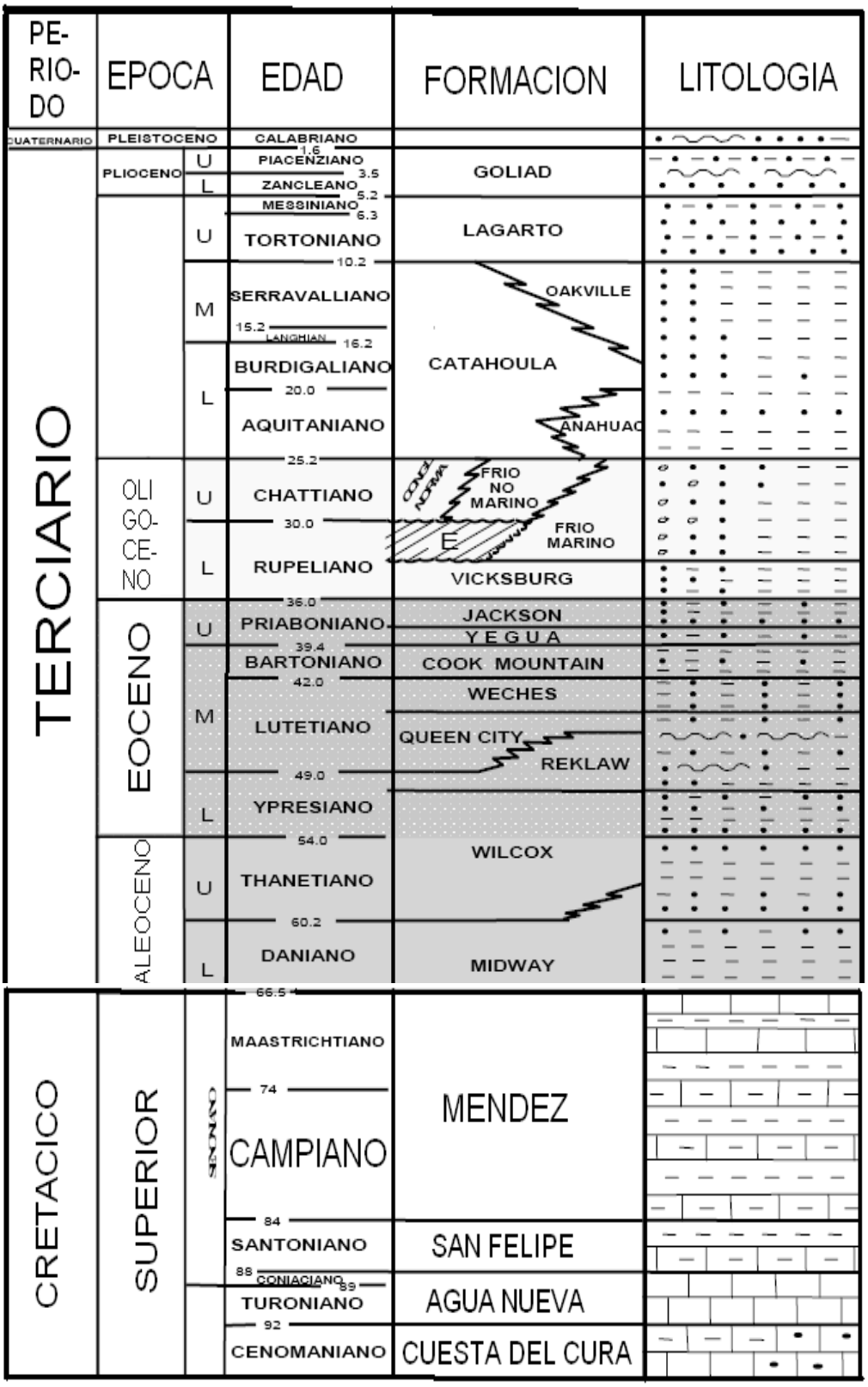


Fig. 3.65 Columna geológica de la Cuenca de Burgos (hacia el sur de la cuenca), parte 1

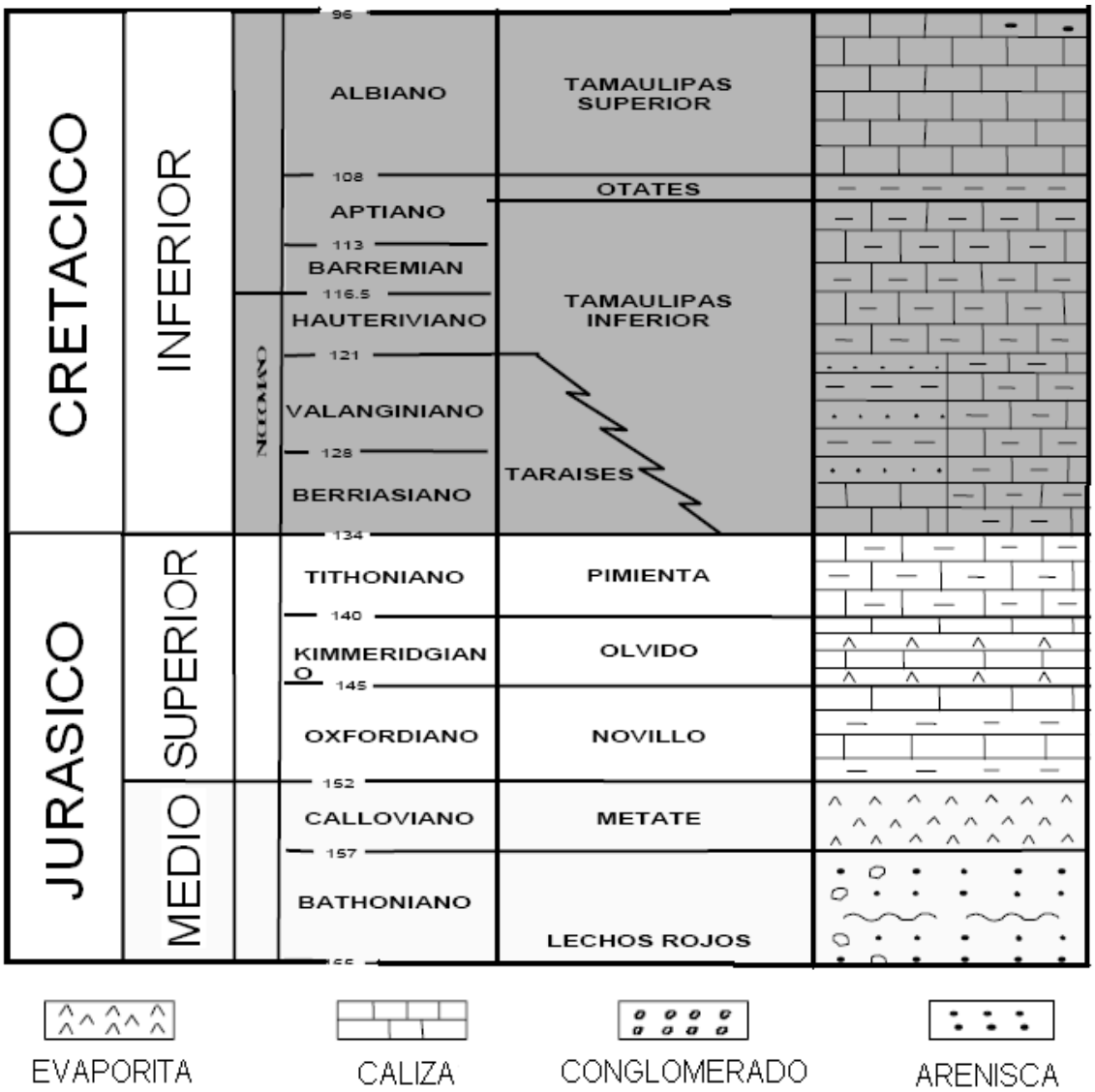


Fig. 3.66 Columna geológica de la Cuenca de Burgos,

parte 2, (hacia el sur de la cuenca)