

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MODELO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS
SÍSMICAS DEL ESTRATO SOMERO APLICADO EN DATOS DE URIBANTE
(CUENCA DEL CATATUMBO)**

IVONNE NATALIA GARCIA MATEUS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2008**

**CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MODELO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS
SÍSMICAS DEL ESTRATO SOMERO APLICADO EN DATOS DE URIBANTE
(CUENCA DEL CATATUMBO)**

IVONNE NATALIA GARCIA MATEUS

DIRECTOR:

WILLIAM MAURICIO AGUDELO PhD

ECOPETROL-ICP

CODIRECTOR:

SAÚL GUEVARA OCHOA MsC

ECOPETROL-ICP

TUTOR

LUIS EDUARDO MORENO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

**TRABAJO DE GRADO INVESTIGATIVO REALIZADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2008

*A mí mamá por su apoyo y su amor
A mis hermanos Darío y Camilo por sus consejos
A mi princesa Karina, la reina del folklór
Y a la tía Negra la más bella !!!!*

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVO GENERAL	16
1. MARCO TEORICO.....	17
1.1 METEORIZACIÓN EN AMBIENTES TROPICALES	17
1.2 LITOLOGÍA	19
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS TROPICALES	22
1.4 HIDROLOGÍA DEL ESTRATO SOMERO	26
1. 5 RELACIÓN ENTRE LA TOPOGRAFÍA Y EL ESTRATO SOMERO.....	28
1.6 PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LOS SUELOS TROPICALES	30
1.6.1 Saturación	30
1.6.2 Porosidad	31
1.6.3 Permeabilidad	31
2. ADQUICISIÓN DE DATOS	33
2.1 MEDICIÓN DE POZOS SOMEROS “UPHOLE”	33
2.1.1 Registros Uphole.....	33
2.1.2 Metodología de adquisición de datos	35
2.2 PROGRAMA SÍSMICO URIBANTE 2005	35
2.3 VELOCIDADES DE LA CAPA SOMERA “WEATHERING”.....	36
3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	39
3.1 LOCALIZACIÓN.....	39
3.2 GENERALIDADES DEL ÁREA DE URIBANTE, CUENCA DEL CATATUMBO	40
3.3 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE URIBANTE.....	41

3.3.1 Estratigrafía	41
3.3.2 Estructural	46
3.4 HIDROGEOLOGÍA Y SUELOS DEL ÁREA DE URIBANTE	47
4. ANÁLISIS GEOLÓGICO	51
4.1 DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS EN RIPIOS	51
4.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)	56
4.3 COLUMNAS LITOLÓGICAS	60
4.4 ANÁLISIS DE MUESTRAS DE SUELOS	61
4.3 ANÁLISIS DE LA DESCRIPCIÓN DE SECCIONES DELGADAS.....	65
5.1 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS POROELÁSTICOS, TEORIA DEM	68
5.1.1 Medio Efectivo Diferencial (DEM).....	69
5.1.2 Modelos elipsoidales para deformación de poros	70
5.1.3 Límites de Voight y Reuss.....	71
5.2 MODELAMIENTO EN EL SOFTWARE 2D	73
5.3 PARÁMETROS PETROFÍSICOS.....	74
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
6.1 DETERMINACIÓN DEL ESTRATO SOMERO	78
6.2 INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	81
6.2.1 Tipos de Meteorización en el área de Uribante.....	84
6.3 ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS	87
6.4 DETERMINACIÓN DE RANGOS DE POROSIDAD PARA VELOCIDADES INFERIORES CORRESPONDIENTES A LA CAPA DE BAJA VELOCIDAD.....	89
6.5 MODELAMIENTO SÍSMICO DE LOS DATOS UPHOLE	94
CONCLUSIONES	97
APORTES Y RECOMENDACIONES.....	99
BIBLIOGRAFÍA	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1, Relación entre la capacidad para el aire y algunas propiedades físicas (Kopecky, 1927; citado por Baver, 1956)	26
Tabla 2, Recopilación de datos Geológicos de los upholes localizados en las Cuencas del Río Zulia y Pamplonita, Adaptado, Corporación Autónoma Regional de la frontera nororienta (Corponor).....	49
Tabla 3, Descripción de Suelos, Tomado de IGAC 2004	50
Tabla 4 Litología en porcentajes del Uphole 2	53
Tabla 5, Litología en porcentajes del Uphole 3	55
Tabla 6, Litología en porcentajes del Uphole 4	56
Tabla 7, Datos de limite liquido y limite plástico del uphole 2.....	63
Tabla 8, Datos de límite liquido y limite plástico del uphole 3	63
Tabla 9, Datos de límite liquido y limite plástico del uphole 4	64
Tabla 10 Valores del límite liquido, limite plástico e índice plástico de los tres uphole	64
Tabla 11 Valores de aspect ratio en concentración para los tres upholes en las distintas capas.	67
Tabla 12 Datos de Temperatura y Precipitación Anual para los tres upholes, Tomado de CORPONOR	85
Tabla 13 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del Uphole 2. En gris se representa el tipo de límite usado.	88
Tabla 14 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del uphole 3	88
Tabla 15 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del uphole 4	89

LISTA DE GRAFICOS

Fig. 1 Variación de la latitud, profundidad de la meteorización, precipitación y temperatura. Adaptado de Strakhov, por López <i>et al.</i> (1992).....	19
Fig. 2 Minerales susceptibles a la meteorización	20
Fig. 3 Perfil de suelos, Hewlett (1982).....	24
Fig. 4 Sección Generalizada ilustrando una topografía joven con cinco capas submeteorizadas, (exageración vertical de 75X), (Cox 1999).....	29
Fig. 5, Sección Generalizada ilustrando una topografía madura con cuatro capas submeteorizadas (exageración vertical 50X), (Cox 1999).....	29
Fig. 6 Grafica de un estudio uphole con fuentes en el pozo y receptores en la superficie: (a) litología; (b) disposición en campo con un receptor y 20 fuentes identificadas; (c) grafica tiempo-profundidad; (d) grafica de velocidad intervalo (Cox, 1999).	34
Fig. 7 Diagrama esquemático de la disposición en campo en un estudio uphole con la fuente en la superficie y receptores en el pozo (Cox, 1999).....	35
Fig. 9 Columna Estratigráfica generalizada del grupo Uribante, (Sin escala), Tomada de ECOPETROL, 2005	42
Figura 10, Mapa Geológico de la zona de estudio, G13 y F13 INGEOMINAS.....	45
Fig. 12 Localización de las Cuencas del Río Zulia y Pamplonita, Norte de Santander. Tomado de Corporación Autónoma Regional de la frontera Nororienta (Corponor).....	48
Fig. 12 Muestra en ripios del Uphole 2 1 metro de profundidad, Formación	54
Figura 13, Muestra en ripios.....	54
Fig. 15 Fragmento de Arenisca impregnada de bitumen del Uphole 2, 15 metros de profundidad, Formación Cuervos	55
Tabla 5, Litología en porcentajes del Uphole 3	55

Tabla 6, Litología en porcentajes del Uphole 4	56
Fig. 15, Columna de los Upholes 2,3 y 4.....	61
Fig. 16, Sección delgada de arenita en fluorescencia roja, Muestra en ripio uphole 4, 1 metro de profundidad.	66
Fig.17, Modelo de aspect ratio, tomado de mavko 1997.....	71
Fig. 18 Modelos de iso-deformación (voigt) y de iso-deformación (reuss), Tomado de Mavko 1996.....	72
Figura 19 Velocidad de onda versus porosidad mostrando los límites voigt y reuss para sedimentos saturados con agua, Yin (1992), Han (1986) and Hamilton (1956).....	72
Fig. 21 Diagrama de componentes para la elaboración de un modelo de roca	73
Fig. 22 Modelo micro de integración de propiedades petrofísicas, Tomado de Manual Velrock	75
Figura 22 Modelo de velocidades y columna litológica del uphole 2. Los círculos representan los picados de los tiempos de arribo. Las líneas representan las capas de diferente velocidad obtenidas por regresión lineal de grupos de picados.	78
Figura 23 Modelo de velocidades junto a columna litológica del uphole 3. Los círculos representan los picados de los tiempos de arribo. Las líneas representan las capas de diferente velocidad obtenidas por regresión lineal de grupos de picados.....	79
Figura 24 Modelo de Velocidades junto a Columna Litológica del Uphole 4.....	80
Figura 25 Esquema representativo de las variaciones de litologías y minerales de alteración del uphole 2. El material meteorizado (arcillolita-arenitas arenosas) se representa en color rojizo-amarillo	82
Fig. 26 Esquema representativo de las variaciones de litologías y minerales de alteración del uphole 3	83
Figura 27 Esquema representativo de las variaciones de litologías y minerales de alteración del uphole 4	84
6.2.1 Tipos de Meteorización en el área de Uribante	84

Tabla 12 Datos de Temperatura y Precipitación Anual para los tres upholes, Tomado de CORPONOR	85
Figura 28 Intensidad y Tipos de Meteorización para los tres upholes según Cooke & Doorkamp (1990)	85
Tabla 13 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del Uphole 2. En gris se representa el tipo de límite usado.	88
Tabla 14 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del uphole 3	88
Tabla 15 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del uphole 4	89
Figura 29 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para arenas	90
Figura 30 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para arcillas	91
Figura 31 Valores Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para 40% de contenido de arenas y 60% de contenido de arcillas	91
Figura 32 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para arenas	92
Figura 33 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para arcillas	92
Figura 34 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para 40% de contenido de arenas y 60% de contenido de arcillas	93
Figura 35 Modelo 2D y trazado de rayos del uphole 2.....	94
Figura 36 Modelo en 2D y trazado de rayos del uphole 3.....	95
Figura 37 Modelo en 2D y trazado de rayos del uphole 4.....	95

AGRADECIMIENTOS

A Dios quien me guió y me ayudo en todos los momentos de angustia y desesperación.

A la UIS, por ser mi segundo hogar, a la escuela de Geología y todo el personal docente, en especial a los profesores Jorge E. Pinto, Germán Meza y Luis E. Moreno, por ayudarme de una u otra forma en este proceso, y al profesor Carlos García por ser un excelente docente.

Al grupo de Estrato Somero liderado por Saúl Guevara por permitirme pertenecer a él y formarme dentro del grupo de investigación.

A William Agudelo, Carlos Piedrahita, Alfredo Tada y Frank Gómez por todos sus aportes y enseñanzas en el Instituto Colombiano de Petróleo ICP.

A German Yuri Ojeda, que además de ser mi calificador, es una persona que con sus consejos y orientaciones me hizo creer en mí y la forma como debo realizar un buen desempeño profesional.

A Néstor Moreno por su ayuda brindada en el momento justo para la descripción de muestras geológicas.

A mis padres, tíos, hermanos y primos por su ayuda, amor y colaboración en todos los años de mi vida y a Claudio Serrano por ser una persona clave en todo mi proceso de formación académica, gracias Claudio por toda tú ayuda.

A Alba Vargas por su ayuda incondicional y consejos desde el inicio de mi carrera.

A mis amigos de siempre, los 2012, Francisco, Marcela, Migue y Yudi por esa amistad grande, verdadera que estuvieron desde el inicio de mi carrera y se que van a estar en todo momento de mi vida para ayudarme y darme buenos consejos, solo quedamos nosotros y poco a poco se nos están dando las cosas.

A mis amiguis que ayudaron en la culminación en todo este proceso Mario, Gigi, Diana la flaca, Oscar, Cristhian el Boca, la Gordis Johanna, Johan y en especial a mi gran amiga Lala La Ladys.

A Oscar E. por ser aquella persona que estuvo conmigo desde que comenzó mi proceso en el ICP, su apoyo y amor bastaron para terminar esta primera meta propuesta en mi vida, Te amo Oscar E.

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y MODELO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS DEL ESTRATO SOMERO APLICADO EN DATOS DE URIBANTE (CUENCA DEL CATATUMBO).*

AUTOR: GARCIA MATEUS Ivonne Natalia**

PALABRAS CLAVE: Uphole, estrato somero, weathering, medios poroelásticos.

En la sísmica de exploración, el estudio del estrato somero contribuye a la obtención de mejores imágenes de las capas más profundas, siendo heterogéneo en sus propiedades y presentando velocidades relativamente bajas. Es necesario utilizar datos geológicos y geofísicos para la caracterización de estas zonas.

La formación de la capa somera se encuentra estrechamente relacionada con el proceso de meteorización, la cual para ambientes tropicales (como en la cuenca del Catatumbo) es de tipo químico fuerte debido a las intensas lluvias y la topografía presente. Para la determinar la correlación del modelo geológico y geofísico se realizó un modelamiento con el fin de simular los datos de Uphole del área de Uribante (sísmica vertical de pozos). Este software permite la simulación directa de las velocidades de onda P y S en mediciones VSP para medios porosos parcialmente saturados. Estos modelos fueron comparados con los modelos de velocidades promedios de las mediciones de uphole.

Como datos de entrada se utilizó la descripción litológica de los upholes modelados y las velocidades de onda P calculadas por modelamiento de tiempos de primeros arribos. A su vez información hidrogeológica y de suelos de las cuencas hidrogeológicas del río Pamplonita y del Zulia se utilizaron para caracterizar geológicamente el área de estudio.

En estos modelos se observa que la capa meteorizada o zona de meteorización y el estrato somero pocas veces corresponden, no siempre el contenido mineral sea arcillas u óxidos determinan las bajas velocidades las propiedades petrofísicas como lo son la porosidad y geometría de poros es un factor influyente en estas zonas de baja velocidad.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Geólogos Ph.D., Willian M. Agudelo, Director; Msc., Saúl Guevara Ochoa, Codirector.

ABSTRACT

TITLE: GEOLOGIC CHARACTERIZATION AND MODELLING PROPAGATION WAVES OF NEAR SURFACE APPLIED URIBANTE DATA, CATATUMBO BASIN .

AUTHORS: GARCIA MATEUS Ivonne Natalia **

KEY WORDS: Uphole, near-surface, weathering, poroelastic media.

In exploration seismology, a better knowledge of the near surface often improves the quality of the seismic image for deeper reflectors. This layer is characterized by having low seismic velocities and highly variable physical properties. It is necessary to use both, geophysical and geological data, to study this layer.

The origin of the near-surface is closely related to the weathering process that in the case of tropical environments (as in the Catatumbo basin) is of strong chemical type, due to the high precipitation and steep topography in these areas. Use modelling, to simulate the uphole seismic data (small scale vertical seismic profiling). This software can model wave propagation in partially saturated media using the lithology, porosity, pore geometry and saturation of the near-surface materials. As input data we used the macroscopic lithological description of the uphole samples, the porosity and pore geometry obtained from thin sections and velocities calculated from first arrival times. Additionally, the hydrogeological and soils information in the Pamplonita and Zulia rivers basins were used to geologically characterize the studied area. By direct modeling of the P-wave velocity, an optimum model of porosity, saturation and pore geometry was obtained, that fitted the observations.

The solution models evidence that the weathering layer and the low velocity layer not often coincide. In addition, these models give physical parameters information that is not easily obtained in laboratory.

* Thesis

** Faculty of Physics – Chemistry Engineerings, Geology School, Geologist Ph.D., William M. Agudelo, Director. Msc., Saúl Guevara Ochoa, Codirector.

INTRODUCCIÓN

El estrato somero es la capa superficial expuesta de manera prolongada a condiciones ambientales (weathering), en estas condiciones ambientales los procesos de meteorización y depositación hacen que esta capa sea poco consolidada es decir de baja velocidad (excepto cuando hay presencia de nivel freático en la capa meteorizada debido a que la velocidad aumenta). De tal manera que en sísmica esta capa de baja velocidad tiene influencia adversa en los reflectores profundos de interés para la explotación petrolera.

Por varios años se ha reconocido que las velocidades de las ondas sísmicas, son sensibles a la porosidad, la litología, la geometría de los poros, la saturación y la presión de poros de la roca en la cual se propagan, a pesar de la complejidad del fenómeno, en las nuevas tecnologías para la detección de hidrocarburos, caracterización y monitoreo de yacimientos hay algunas aproximaciones en estas relaciones las cuales las podemos al modelar datos con el algoritmo DEM. (Differential Medium Effective)

En esta tesis se busca contribuir a los modelos de velocidades y espesores más confiables del estrato somero para el mejoramiento en la imagen de los reflectores, en el caso de la zona montañosa de Colombia correlacionando la propagación de las onda P en medios porosos parcialmente saturados, es decir características geológicas (análisis petrológico y petrofísico) y geofísicas comparando litología y petrofísica con modelos de velocidades de la onda P (vertical seismic profiling – VSP) y de la onda directa (mediciones uphole) determinadas en campo, laboratorio y mediante simulación. De esta manera se desea responder porqué las bajas velocidades afectan al estrato somero en suelos tropicales.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la litología, la saturación de agua, y la porosidad y la geometría de poros en las velocidades sísmicas observadas en el estrato somero.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar el tipo de meteorización que predomina y el espesor que se presenta en cada uphole.
- Construir un modelo petrofísico que permita simular la propagación de ondas considerando la litología, porosidad y geometría de poros y saturación de los diferente materiales presentes en cada uphole.
- Determinar un rango de valores de porosidades y geometría de poros que expliquen las velocidades observadas en cada uphole.

1. MARCO TEORICO

1.1 METEORIZACIÓN EN AMBIENTES TROPICALES

Las zonas tropicales son regiones geográficas de la tierra donde el sol alcanza su mayor punto, estas zonas se encuentran localizadas en la línea ecuatorial. Las altas temperaturas, las lluvias abundantes, la gran vegetación y los vientos prevalecen en estas zonas (Figura 1) haciendo que la meteorización de las rocas sea más intensa (Wadsworth F. 2000). Estas condiciones ambientales afectan significativamente la composición del mineral del suelo así por ejemplo se sabe que el contenido de caolinita disminuye con el aumento promedio de las lluvias que son el principal factor en la formación de suelos en los trópicos y su precipitación promedio es muy superior en las zonas tropicales que en altas latitudes como resultado del régimen de circulación atmosférica global. (Wadsworth F. 2000).

El área de estudio comprende parte de la Cuenca del Catatumbo, el cual hace parte el municipio denominado Uribante, denominado así el programa sísmico que llevo a cabo este estudio (Capítulo 2). Este trabajo de se realizó en esta zona ya que contaba con las características geológicas que presentan estos ambientes tropicales.

En general es posible distinguir dos tipos de meteorización:

1. La meteorización física que resulta de la acción de uno o varios procesos que ocasionan el rompimiento mecánico de las rocas sin alterar su composición. Mecánicamente las rocas son más vulnerables cerca de la

superficie que en el interior de la corteza y son más competentes a esfuerzos de compresión que a esfuerzos de tensión y cizalladura (Suárez 1990).

2. La meteorización química consiste en la ruptura de las rocas por medio de reacciones químicas o simplemente por la descomposición de los minerales primarios y la subsiguiente síntesis de los minerales secundarios. La descomposición se debe a la eliminación de los agentes que cementan la roca, e incluso afectan a los enlaces químicos del mineral. Estos procesos pueden darse por solución, hidratación y las más comunes en zonas tropicales las producidas por oxidación e hidrólisis (Suárez 1990).

La meteorización química se manifiesta al máximo en las regiones tropicales (Figura 1) donde la precipitación y temperatura son altas, la evapotranspiración es baja y el contenido de la densidad de vegetación aumenta la tasa de meteorización haciendo que la concentración de dióxido de carbono quede libre en la atmósfera.

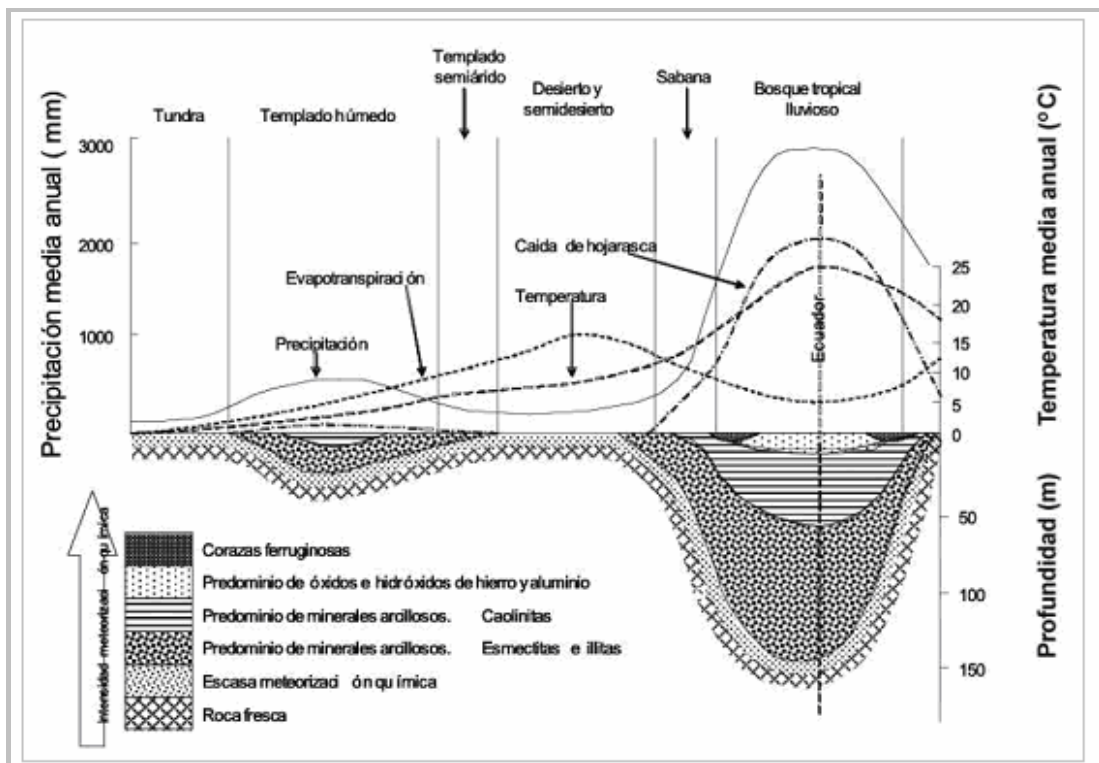


Fig. 1 Variación de la latitud, profundidad de la meteorización, precipitación y temperatura. Adaptado de Strakhov, por López *et al.* (1992).

1.2 LITOLOGÍA

Algunos materiales son más susceptibles a la meteorización que otros. Es así como las rocas con alto contenido de cuarzo sufren menos alteración que rocas ricas en feldspatos que fácilmente se meteorizan a ciertos minerales arcillosos, lo cual ocurre muy a menudo en suelos de ambientes tropicales. Los minerales que componen el estrato somero dependen del material parental, topografía y los procesos de alteración de los materiales que se encuentran en el subsuelo.

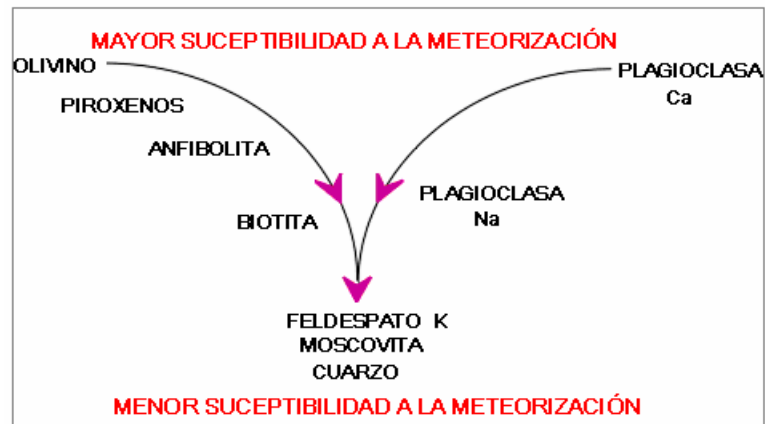


Fig. 2 Minerales susceptibles a la meteorización

La dureza del mineral se encuentra relacionada con la susceptibilidad del material a la meteorización y es posible hacer una relación, a mayor dureza mayor va ser la resistencia que tenga el material a la meteorización. Generalmente, los minerales pueden hacerse vulnerables a los procesos de meteorización debido a la acción biológica o por efecto del agua y tienden a sufrir transformaciones que terminan en arcillas o en óxidos. Estos productos finales de la meteorización pueden evidenciarse por medio de análisis de Difracción de Rayos X (DRX) cuando se presentan minerales estratificados. A continuación se nombrarán los materiales más influyentes en la capa superficial:

Arcillas

Las arcillas se forman principalmente por la meteorización de feldespatos a partir de procesos físicos, químicos y/o biológicos, como es el caso de la neoformación y transformación de minerales arcillosos en los mantos de alteración (suelo o regolito) (Suárez 1999). Los tipos de arcillas encontradas en la zona de estudio se describirán a continuación. Según Hulbut, 2001:

- *Cloritas*

Se forman a partir de los minerales ferromagnesianos que pueda contener la roca: biotita, anfíbol, piroxeno, olivino. Las tonalidades verdes que presentan son debido a esta meteorización de los estos silicatos provenientes de rocas ígneas.

- *Illitas*

Se forman como producto de alteración de micas y feldespatos. Las condiciones óptimas para su formación corresponden a un pH elevado y rocas ricas en minerales portadores de aluminio y potasio. También se forman a partir de la diagénesis de caolinita o montmorillonita bajo la influencia de temperatura y presión consecuentes con la profundidad de soterramiento y de la concentración iónica. La estructura de la illita y su composición puede expresarse como $KAl_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$.

- *Caolinitas*

La composición química de la caolinita puede expresarse como $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Su ocurrencia es común como producto de alteración hidrotérmica de feldespatos y micas, generados principalmente en condiciones de bajo pH y abundante disponibilidad de agua y de sedimentos provenientes de rocas que contienen dichos minerales. La caolinita es uno de los productos más comunes de la descomposición de las rocas, por lo cual se encuentra frecuentemente en suelos y sedimentos transportados por el agua.

Óxidos e Hidróxidos

Se forman por meteorización de silicatos primarios o secundarios y algunos son la fase mineral más estable que aparece en suelos bastante oxigenados. Los principales óxidos formados en el área de estudio se describen a continuación. Según Hulbut 2001:

- *Hematita* (Fe₂O₃)

Mineral de color rojizo, de foliación laminar y brillo metálico, mineral mena principal del hierro. Puede formarse como producto de alteración de sublimación en relación con actividades volcánicas en depósitos metamórficos y como mineral accesorio de rocas ígneas. También se puede producir por la meteorización de rocas que confinen hierro en cuyo caso se presenta una coloración rojiza.

- *Pirita*

Sulfuro de hierro (FeS₂) de forma cúbica. Presenta un brillo metálico y color dorado, y se da por la descomposición de los sulfuros. Se altera fácilmente a óxidos de hierro y a la limonita.

- *Anastasa* (TiO₂)

Pertenece al grupo del rutilo. Presenta una coloración roja y brillo adamantino (óxido de titanio).

- *Goethita*

Presenta un color pardo y brillo sedoso. Se forma en condiciones de oxidación como producto de meteorización de minerales que contienen hierro. También puede formarse como precipitado inorgánico o biogénico de las aguas (silicatos de Fe⁺²).

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS TROPICALES

A los suelos predominantes en las zonas tropicales se les denomina también como “suelos tropicales” y son el producto de la meteorización extensiva y profunda que afectan las velocidades sísmicas en las formaciones del estrato somero por (Suárez, 1998):

1. Por ser generados *in situ*, su base marca el nivel de meteorización.
2. Las capas en sitios de suelos residuales tropicales son marcadamente heterogéneas, favoreciendo variaciones espaciales de la velocidad.
3. Los suelos tropicales se encuentran en estado húmedo no saturado y son altamente permeables, esto tiene un efecto de corto plazo sobre el nivel freático el cual hace variar por temporadas el espesor del estrato somero

Al secarse estos materiales (suelos) generalmente se hacen muy duros como resultado de la acción cementante de los óxidos de hierro y aluminio. Los suelos tropicales varían según la zona donde se formen. En las zonas húmedas de las tierras bajas los suelos tienen un alto contenido de arcilla y un bajo contenido de sedimentos. En las zonas de bosque húmedo estos suelos son muy friables que debido a las arcillas consisten casi enteramente de caolinita y sesqui-óxidos. En las sabanas los suelos tropicales comúnmente tienen una capa superficial arenosa. Con la elevación y la sequedad del clima el contenido de arcilla decrece (Wadsworth F. 2000).

Tradicionalmente se ha dividido el perfil del suelo en horizontes (Figura 3). El horizonte A corresponde al humus y materia orgánica. El horizonte B corresponde al sector meteorizado y en el horizonte C se encuentra la roca intacta. Los suelos residuales se caracterizan por tener el horizonte A más oscuro que los demás horizontes debido a la presencia de humus.

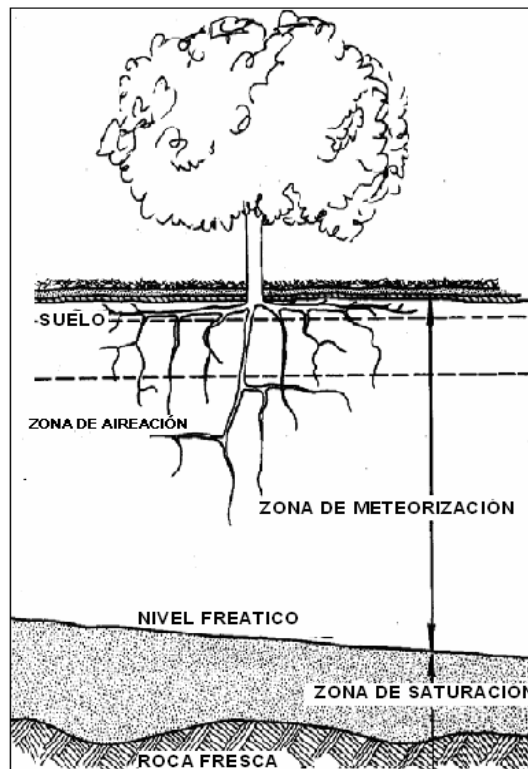


Fig. 3 Perfil de suelos, Hewlett (1982)

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Este sistema está basado en el trabajo de Badillo y Rodríguez (1990) quienes determinaron el tipo de suelo a partir de sedimentos finos o gruesos y según su plasticidad a partir de la permeabilidad. Estos estudios están basados en las teorías de Terzaghi quien fue el fundador y guía de la mecánica de suelos moderna (Anexo 1).

- Suelos Gruesos: Corresponden principalmente a suelos tipo gravas (G) y arenosos (S) y se pueden dividir en cuatro grupos:

1. GW-SW (Well graded, Suelos gravosos bien gradados-suelos arenosos bien calibrados): Suelos poco finos o limpios completamente. La presencia de los finos que puedan contener estos grupos no debe producir cambios apreciables en las

características de resistencia de la fracción gruesa, ni interferir con su capacidad de drenaje.

2. GP-SP (Poorly graded, Suelos gravosos mal gradados-suelos arenosos mal calibrados): Material prácticamente limpio de finos, mal graduados de apariencia uniforme o presentan un predominio de un tamaño o de un margen de tamaños.

3. GM-SM: Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. El contenido de finos afecta las características de resistencia y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa.

4. GC-SC (Clay, Gravas arcillosas, arenas arcillosas): Material con cantidad apreciable de finos plásticos.

- Suelos Finos: Se refiere a suelos tipo limo inorgánico (M), tipo arcillas inorgánicas (C) y a limos y arcillas orgánicas (O), cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen según su límite líquido en dos grupos: Si son suelos de baja compresibilidad (L, low compresibility) tienen un límite líquido menor a 50%. Por el contrario, los de alta compresibilidad (H, high compresibility) corresponden a suelos finos con límite líquido mayor al 50%. Estos suelos finos pueden ser de tres tipos:

1. CL-CH (Arcillas baja compresibilidad, arcillas alta compresibilidad)

2. ML-MH (Limos inorgánicos baja compresibilidad, Limos inorgánicos alta compresibilidad)

3. OL-OH (Limos y arcillas orgánicas, alta compresibilidad)

Según la textura, coloración y drenaje el suelo se puede clasificar de una manera sencilla en suelos arenosos, francos y arcillosos. Las Características generales de los suelos presentan propiedades especiales muy relacionadas con la clasificación agrológica (Anexo 2). La cohesión y la humedad también son factores importantes de la determinación de un tipo de suelo. La cohesión

aumenta con la disminución en la humedad. La arcilla tiene una cohesión mucho mayor que los suelos francos arenosos finos (Anexo 3)

Las arcillas tienen capacidades para el aire bastante menores, por lo cual para un buen crecimiento vegetal en los suelos arcillosos, uno de los principales requisitos es una aireación adecuada (Baver, 1956).

TIPO DE SUELO	POROSIDAD TOTAL %	CAPACIDAD PARA EL AIRE (Macroporos) %
Arcilloso pesado compacto	48.0	0.4
Franco arcilloso	46.1	5.0
Franco arcilloso	40.7	6.8
Franco compacto	41.1	6.2
Franco friable	49.3	12.2
Arenoso muy fino	49.3	10.0
Franco arenoso fino	49.5	14.9

Tabla 1, Relación entre la capacidad para el aire y algunas propiedades físicas (Kopecky, 1927; citado por Baver, 1956)

1.4 HIDROLOGÍA DEL ESTRATO SOMERO

Como se dijo anteriormente, el agua es el factor que más comúnmente afecta al material que se meteoriza en zonas tropicales. El agua llega al estrato somero de diversas formas:

- ***Precipitación***

Es el volumen o columna de agua lluvia que cae sobre un área en un período de tiempo, la cual tiene una influencia directa en la infiltración y en el régimen del agua subterránea, y a su vez afecta la estabilidad de taludes o laderas.

La precipitación afecta las velocidades de la capa meteorizada de diferentes maneras:

- Régimen de lluvias. En zonas tropicales cada región posee un sistema de lluvias que se repite en forma similar cada año. Es común encontrar áreas donde ocurren anualmente dos períodos de lluvia con dos períodos secos, o una sola temporada de lluvias con un período seco. En estas zonas, en general, el período de los meses de Diciembre y Enero es seco. Como el nivel freático cambia con la temporada, así el espesor de las capas de baja velocidad sísmica puede ser estacional.
- Aguaceros Torrenciales. Es común en la zona de montaña la ocurrencia de aguaceros de gran magnitud en un período de tiempo de una o pocas horas. En la precipitación se debe tener en cuenta la intensidad de la máxima lluvia o de las lluvias más fuertes en una hora, en un día, mes o año y en algunas ocasiones la cantidad de lluvia en períodos menores a una hora. Debe diferenciarse el caso de zonas de precipitación alta permanente, en las cuales el nivel freático es alto y constante, del caso de lluvias esporádicas o épocas de lluvias intensas, en donde el suelo no saturado es saturado de repente.
- Lluvias Acumuladas. La ocurrencia de lluvias, durante varios días consecutivos o con pocos días de diferencia, puede producir fenómenos de acumulación de agua subterránea (Suárez J. 1999).

- ***Infiltración***

La infiltración se define como el movimiento del agua desde la superficie del terreno hacia el suelo o roca por los poros o intersticios y discontinuidades de la masa térrea. La infiltración a su vez puede dividirse entre aquella parte que

contribuye a aumentar el contenido de agua de la zona no saturada y aquella que recarga el sistema saturado de agua subterránea (Suarez, 1990). El aumento de saturación produce un aumento de las velocidades de propagación de ondas sísmicas.

- ***Escorrentía***

La escorrentía o agua superficial es la proporción de precipitación que fluye superficialmente sobre el suelo. En zonas de topografía inclinada el agua que cae al suelo fluye principalmente por escorrentía gran cantidad y la restante se acumula sobre el subsuelo mientras que en topografías planas el suelo absorbe más fácilmente el agua haciendo que el nivel freático sea un poco más superficial.

Nivel Freático

Es el nivel superior de la zona de saturación del agua subterránea en las rocas permeables. Este nivel puede variar estacionalmente, a causa de las precipitaciones y la evaporación. Por debajo del nivel freático el suelo se encuentra saturado. El agua existente en la zona de saturación se designa por lo general, como agua freática y su superficie superior es el nivel freático. (Suárez, 2003).

1. 5 RELACIÓN ENTRE LA TOPOGRAFÍA Y EL ESTRATO SOMERO

La topografía afecta la formación del suelo de varias maneras: en la inestabilidad gravitacional, en el clima, en el drenaje y en el cambio de temperatura con la altitud. En una topografía con pendientes inclinadas, una parte del agua que cae se infiltra y la otra parte se va por escorrentía, algo que ocurre inversamente en zonas con topografía plana. Esto se relaciona con el material del suelo ya que puede determinar su estructura y definir como es la formación de la primera capa del suelo.

Cox 1999, propuso dos tipos de topografía, la topografía joven que se caracteriza por una intensa actividad de erosión vertical (Fig. 4) y una topografía madura (Fig.5) en la cual la superficie una indican una variación no real del espesor de la capa superficial somera, ejemplos de esta última incluyen antiguos canales o valles glaciales que fueron rellenadas de sedimentos.

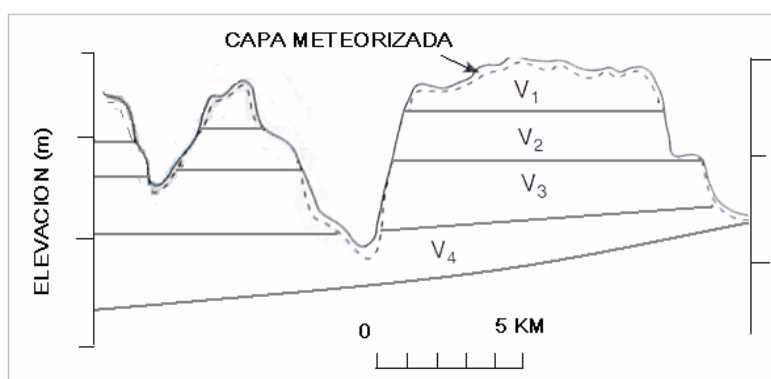


Fig. 4 Sección Generalizada ilustrando una topografía joven con cinco capas submeteorizadas, (exageración vertical de 75X), (Cox 1999)

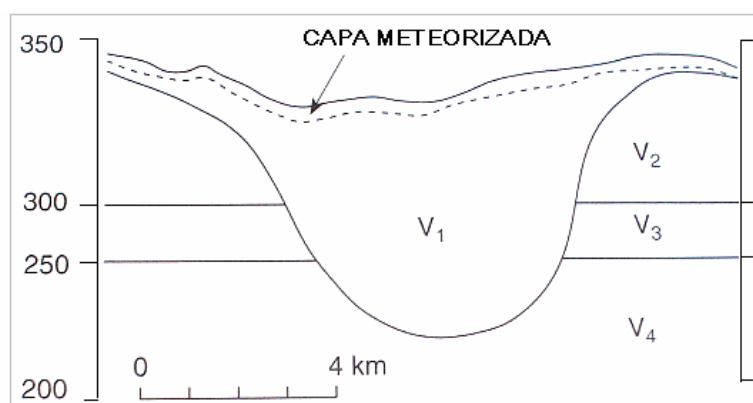


Fig. 5, Sección Generalizada ilustrando una topografía madura con cuatro capas submeteorizadas (exageración vertical 50X), (Cox 1999)

La primera capa hace referencia al sector meteorizado y las capas llamadas submeteorizadas son capas que según el autor, son de velocidades que no superan los 1800 m/s.

1.6 PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LOS SUELOS TROPICALES

La petrofísica estudia las relaciones entre las propiedades físicas de las rocas y la manera en que estas se relacionan con las velocidades sísmicas, resistividad, temperatura, etc (Sheriff, 2001). Las propiedades petrofísicas de los suelos que fueron consideradas en este trabajo fueron:

1.6.1 Saturación

La saturación de agua en un suelo puede definirse como:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100$$

Donde V_w es el volumen de agua del suelo y V_v el volumen de vacíos, expresado como un porcentaje. Así una saturación de 0% indica a que el espacio poral está ocupado totalmente por aire. Por el contrario, una saturación de 100% indica que los poros están ocupados totalmente por agua.

El agua que penetra en el suelo por efecto de la gravedad ocupa parte de los espacios porosos de los sedimentos o rocas que se encuentren en el subsuelo, mientras que otra parte es ocupada por el aire retenido que no pudo escapar. La zona de aireación es la zona por encima de la franja capilar en donde los poros del suelo, sedimento o roca no están saturados con agua, sino que los poros están llenos fundamentalmente con aire (Figura 3). Por debajo de esta zona comienza la zona no saturada donde todos los espacios porosos o cualquier otro espacio libre son compartidos por el agua. A partir de cierta profundidad empieza la zona de saturación en la cual todos los espacios libres y porosos se encuentran totalmente ocupados por agua.

1.6.2 Porosidad

La porosidad puede definirse como ϕ :

$$\phi = \frac{V_v}{V_t}$$

Es decir es la fracción del volumen total de la roca (V_t) con espacios abiertos o poros (V_v). Esto determina la cantidad de agua que puede contener la roca. En sedimentos o rocas sedimentarias la porosidad depende del tamaño de grano, forma de grano, y el grado de cementación. Las dimensiones de los poros también son importantes, existiendo poros de dimensiones capilares, donde el agua no circula, siendo mayor la posibilidad de adherencia que la de percolación; y poros no capilares, que facilitan el drenaje y la aireación. Las raíces de las plantas van a tomar el agua de los poros capilares. Es posible determinar la densidad del suelo según el grado de porosidad que presente, un suelo con más poros es menos denso que otro con inferior porosidad.

La naturaleza de los líquidos que fluyen a través de los poros entre los granos de arena a menudo determina cambios en los poros y en la porosidad, como también lo hacen la composición de los granos y su estabilidad química.

1.6.3 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración y a la tasa de percolación. El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad.

El dato geofísico que se utiliza en este trabajo fue la velocidad de propagación de ondas sísmicas, que puede ser considerado también una propiedad física del estrato somero. Sin embargo será discutido en el Capítulo 5 dentro de la adquisición de datos geofísicos.

En este capítulo se ha hecho un breve recuento de las características del estrato somero, objeto de estudio de este trabajo. Se puede concluir que:

1. En ambientes tropicales predomina la meteorización química que da como resultado principalmente suelos residuales ricos en arcillas y óxidos.
2. El factor principal de la meteorización es el agua, que se involucra en este proceso por medio de la precipitación, la infiltración y la escorrentía.
3. El estrato somero coincide en general con una capa de baja saturación y de alta porosidad.
4. Variaciones en el nivel freático y de la humedad de la zona no saturada pueden hacer que las velocidades sísmicas del estrato somero sean variables con la temporada e incluso tras fuertes lluvias.

2. ADQUICISIÓN DE DATOS

La adquisición de datos sísmicos se realizó durante dos fases: La primera consistió el Programa Sísmico de Uribante (2005) en el cual se registraron 14 líneas sísmicas 2D, 4 pozos a 60 metros de profundidad (upholes) y la geología de campo, y una segunda fase (julio 2007) consistió en visitar la zona para tomar datos a partir de muestras de campo y coleccionar la información hidrogeológica suministrada por la Corporación Autónoma Regional de la frontera nororiente (Corponor). A continuación se realizará una breve explicación de la primera etapa teniendo estos datos de mediciones de uphole de las capas más superficiales.

2.1 MEDICIÓN DE POZOS SOMEROS “UPHOLE”

2.1.1 Registros Uphole

Las mediciones uphole consisten en la medición directa de los tiempos de propagación sísmica en pozos, cuantificando la velocidad promedio y la velocidad intervalo las cuales pueden correlacionarse con la litología.

Según Cox (1999), hay dos tipos de configuraciones principales en estudio uphole. La primera consta de varias fuentes dentro del pozo y uno o más receptores en superficie (Figura 6). La segunda consta de fuentes en la superficie y receptores dentro del pozo (Figura 7), y es conocida como método *downhole*. Los principales componentes de interpretación de registros uphole son:

- Picar los primeros arribos de cada receptor.

- Aplicar algunas correcciones necesarias a estos tiempos (*corrección geométrica*) (Cox, 1999) para el caso de receptores en superficie.
- Graficar los datos y estimar las velocidades promedios e intervalos, y los espesores de las capas identificadas. (Figura 6).

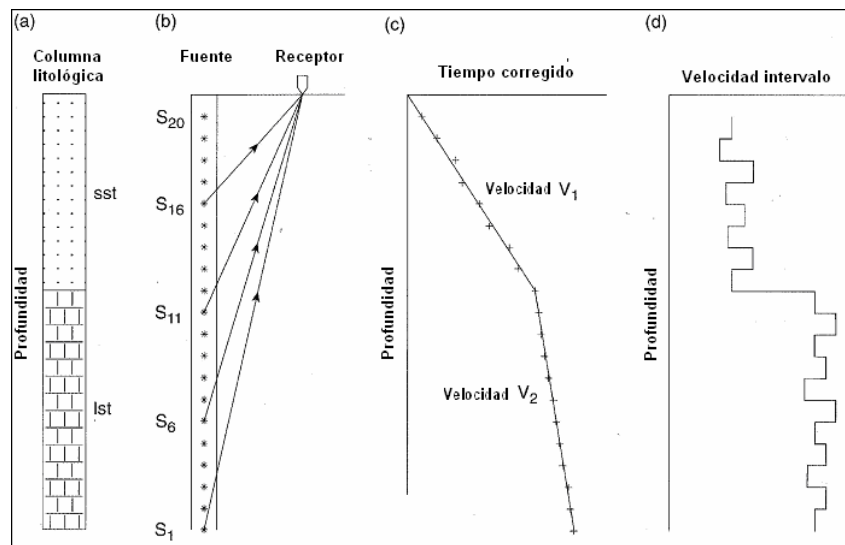


Fig. 6 Grafica de un estudio uphole con fuentes en el pozo y receptores en la superficie: (a) litología; (b) disposición en campo con un receptor y 20 fuentes identificadas; (c) grafica tiempo-profundidad; (d) grafica de velocidad intervalo (Cox, 1999).

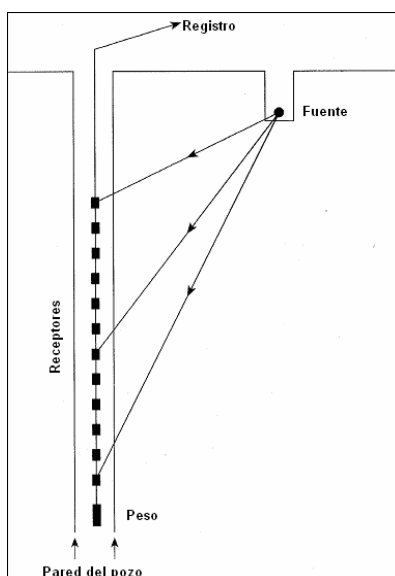


Fig. 7 Diagrama esquemático de la disposición en campo en un estudio uphole con la fuente en la superficie y receptores en el pozo (Cox, 1999).

2.1.2 Metodología de adquisición de datos

Los métodos utilizados incluyeron la toma de datos en registros de pozos o uphole, que incluyeron muestras tomadas dentro de estos pozos y datos de tiempos de arribo de ondas sísmicas. Estos pozos se localizaron sobre líneas sísmicas adquiridas en el área del Catatumbo (Figura).

2.2 PROGRAMA SÍSMICO URIBANTE 2005

La adquisición de datos incluyendo un levantamiento geológico se realizó en los meses de septiembre a octubre del año 2005 con el propósito de conocer en detalle los contactos y relaciones estratigráficas y estructurales entre las unidades, proyectándolas en profundidad. Para este trabajo de investigación se contó con información adquirida de dos líneas sísmicas del Programa de Uribante el cual contienen información geológica de muestras en ripios. Sobre estas líneas se perforó pozos someros o uphole con el fin de obtener velocidades sísmicas y

muestras geológicas de muestras en ripios. Las líneas sísmicas en las cuales se realizó este trabajo corresponde a la línea 1405 que corresponde al pozo 2 y la línea 1040 donde se encuentran los pozos 3 y 4. Estos pozos fueron perforados hasta una profundidad de 60 metros y el muestro de ripios se realizó cada 5 metros comenzando desde el 1 metro de profundidad.

2.3 VELOCIDADES DE LA CAPA SOMERA “WEATHERING”

El término de capa meteorizada (*weathering*) es un poco distinto para geólogos y geofísicos. Por ejemplo Sheriff (1991) la definió como “una capa de baja velocidad de la superficie somera donde usualmente la porción de aire es el que ocupa los espacios porosos de la roca y sedimentos no consolidados en vez del agua”. Como puede verse la base de su definición Geofísica es su baja velocidad, al punto que en la sísmica para esta capa se le rotula como LVL que significa *low velocity layer* (capa de baja velocidad). Sus velocidades que generalmente se encuentran entre unos 500 a 800 m/s, aunque en algunos casos pueden reducirse hasta 150 m/s. Sin embargo desde un punto de vista geológico, se define la capa meteorizada como aquella en que una roca parental ha sido alterada, lo cual puede o no tener relación con las velocidades sísmicas (Cox, 1999). Por ejemplo puede imaginarse una capa de material meteorizado al interior de la cual se encuentra el nivel freático. La capa de baja velocidad geofísica puede terminar en el nivel freático que no corresponde necesariamente con la base de la meteorización geológica.

La capa de baja velocidad de la sísmica tiene un espesor que puede variar de unos pocos centímetros a 50 m o más. Ella puede ser extremadamente irregular y su litología, espesor, densidad y velocidad pueden variar rápidamente tanto en la dirección vertical como horizontal. La capa meteorizada además normalmente

tiene una muy alta rata de energía absorbida, reduciendo la energía de la fuente que penetra hacia el subsuelo (Cox, 1999)

Velocidades en la Superficie Somera

El rango de velocidades del estrato somero puede tener extremos de unos 150 A 800 m/s. Para poner este rango en perspectiva puede compararse con la velocidad del sonido en el aire y agua, que tienen valores típicos de 340 y 1500 m/s respectivamente. La velocidad de las ondas sísmicas en el agua es significativamente reducida cuando las burbujas de aire o gas están presentes y se incrementan cuando se congela. Similarmente, las rocas sedimentarias tienen un incremento en la velocidad cuando su temperatura esta por debajo de 0°C por largos periodos y el agua en los espacios porosos se congela. La velocidad de la capa meteorizada es generalmente menor que la de la capa submeteorizada bajo esta. Se dijo en el capítulo anterior que estas velocidades pueden variar apreciablemente con la temperatura o la saturación del agua y pueden cambiar con las estaciones del año (Cox 1999).

Velocidades en rocas consolidadas y sedimentos no consolidados

Algunos manuales y tablas asignan valores de velocidad de propagación de ondas sísmicas para rocas consolidadas comunes situadas a una profundidad apreciable. Pero estas velocidades son generalmente más altas que las de la misma roca cercana a la superficie. El problema consiste en que las velocidades de superficie las que se requieren para calcular las correcciones estáticas. Es por esto que incluso en zonas de rocas que afloran es útil hacer análisis de refracciones.

Las velocidades sísmicas en materiales no consolidados, dependen de la saturación del agua y están relacionadas con la compactación y el espesor. La saturación es un factor significativo en la influencia de la velocidad de onda

sísmica compresional. El incremento en la saturación del agua y en la velocidad algunas veces coincide con el nivel freático.

Velocidades en el lodo

Lester (1932) observó que la velocidad de la capa meteorizada se encuentra en un rango de 610 a 760 m/s, pero también notó bajas velocidades en la superficie somera con un valor de unos 170 m/s. Igualmente lester también sugirió que algunos tipos de sedimento de la superficie somera, podrían ser tratados como fluidos (Cox 1999).

Velocidades en el Agua

La velocidad del sonido en el agua es frecuentemente de unos 1500 m/s. El agua fresca a 0 °C puede llegar a tener un valor cercano a los 1400 m/s, mientras que el agua salada unos 35 °C puede tener velocidades cercanas a 1550 m/s (Cox 1990). Bajo la superficie, la temperatura decrece con la profundidad en un orden de 8 a 10 °C a 1000 metros de profundidad (Ewing and Worzel, 1984). Sin embargo la velocidad mínima asociada a una profundidad de agua determinada puede variar en localidades diferentes alrededor del mundo. Variaciones de temperatura, salinidad, fresca o ambas, dan lugar a cambios locales en la velocidad del sonido en el agua, (Cox, 1999).

3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1 LOCALIZACIÓN

El Bloque Uribante se ubica en la parte más oriental de la cuenca del Catatumbo en límites con Venezuela. De las líneas sísmicas colectadas en este estudio, dos líneas coincidían con información geológica en profundidad tal como muestras de ripio tomadas en pozos uphole. Las líneas sísmicas son la 1405 a la cual pertenece el uphole 2 y la línea 1040 a la cual pertenecen los pozos 3 y 4 (Figura 8)

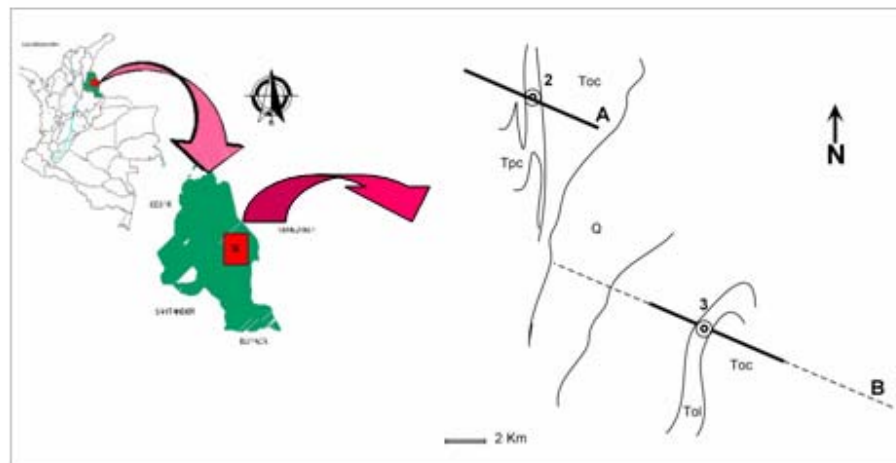


Figura 8 Localización geográfica del área de estudio.

3.2 GENERALIDADES DEL ÁREA DE URIBANTE, CUENCA DEL CATATUMBO

La cuenca del Catatumbo se localiza en el Suroriente del territorio Colombiano en límites con Venezuela. Las rocas que afloran en zona de Uribante son rocas sedimentarias desde el Aptiano (Grupo Uribante) hasta el reciente, siendo más frecuentes y ampliamente distribuidas las rocas del Terciario, específicamente las que abarcan desde el Paleoceno superior (Formación Los Cuervos) hasta el Mioceno (Formación Guayabo). Las rocas más antiguas se encuentran en los extremos sur oriental y sur occidental del bloque en los núcleos de estructuras anticlinales, mientras que las rocas más recientes están en la parte central, como núcleo de estructuras sinclinales (Figura). De igual manera, gran parte de la zona central del área del proyecto se encuentra cubierta por sedimentos cuaternarios, en su gran mayoría aluviales de los ríos Zulia, Pamplonita y Guaramito, en las cuales se ha desarrollado un intenso y extenso cultivo de arroz (ECOPETROL, 2005).

Las rocas se ven afectadas por grandes pliegues tanto sinclinales como anticlinales siendo más frecuentes los segundos, aun cuando el rasgo estructural más grande e importante es el Sinclinal del Zulia. Igualmente se encuentran numerosas fallas, la mayoría de las cuales presenta un rumbo aproximado Norte – Sur, dentro de las cuales se destacan las de Aguardiente, González, Pasajero y Ricaurte, todas de tipo inverso, con vergencias predominantemente al oriente (ECOPETROL, 2005).

Los pozos fueron perforados a una profundidad de 60 metros, y en ellos se colectaron muestras de ripio cada 5 metros hasta llegar a los 60 metros. El pozo 2 que coincide con la línea sísmica 1405 el cual penetró rocas de la Formación Cuervos. El pozo 3 cae sobre la línea sísmica 1040, el cual penetra parte de la

Formación León y el pozo 4 igualmente sobre la línea 1040 que perforó rocas de la Formación Carbonera.

3.3 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE URIBANTE

3.3.1 Estratigrafía

En el área de influencia de las líneas sísmicas realizadas en el programa Uribante 2005, afloran unidades que van desde el Cretáceo Inferior hasta el Cuaternario diferenciándose tanto por rasgos geomorfológicos como por contrastes litológicos. A continuación se reseñan las unidades geológicas intersecadas por las dos líneas sísmicas que son de las que se cuentan con información geológica a partir las muestras recolectadas. Las unidades más antiguas afloran en los extremos sur oriental (sector de San Faustino) y sur occidental (Anticlinal de Aguardiente) del Bloque, donde fallas inversas ponen en contacto rocas cretácicas con rocas más recientes. En la zona del Cerro Tasajero la secuencia sedimentaria no presenta fallamiento y se diferencian rocas de la Formación Catatumbo (Ksct) en contacto normal con las rocas terciarias de la Formación Barco (Tpb) en el eje del Anticlinal de Pasajero (Figura)

- *Grupo Uribante (Kiu):*

Deriva su nombre del Río Uribante en Venezuela. Es la más antigua de las unidades descritas en el Bloque Uribante y se divide en tres Formaciones que de base a tope son: Tibú, Mercedes y Aguardiente. En el Bloque Uribante esta unidad presenta afloramientos en el sector de San Faustino, en el carretable que conduce al corregimiento de Ricaurte, donde es posible identificar las dos formaciones superiores de la unidad formando una estructura anticlinal, hacia el núcleo predominan las intercalaciones de calizas, lodolitas y areniscas de la Formación Mercedes, con muy pocos afloramientos y en los flancos se

observaron areniscas cuarzosas muy fracturadas correspondientes a la Formación Aguardiente (ECOPETROL 2005)

En el sector occidental, en la Loma de Astilleros, aunque se encuentran afloramientos de las tres Formaciones, es la Formación Aguardiente la que presenta mejor y más extensa exposición, con areniscas de cuarzo, localmente glauconíticas, las cuales presentan estratificación cruzada. El espesor de la unidad, de acuerdo a observaciones de campo y datos del pozo Cerro González - 1, es de 550 metros. La edad asignada a esta unidad es Aptiano – Albiano.

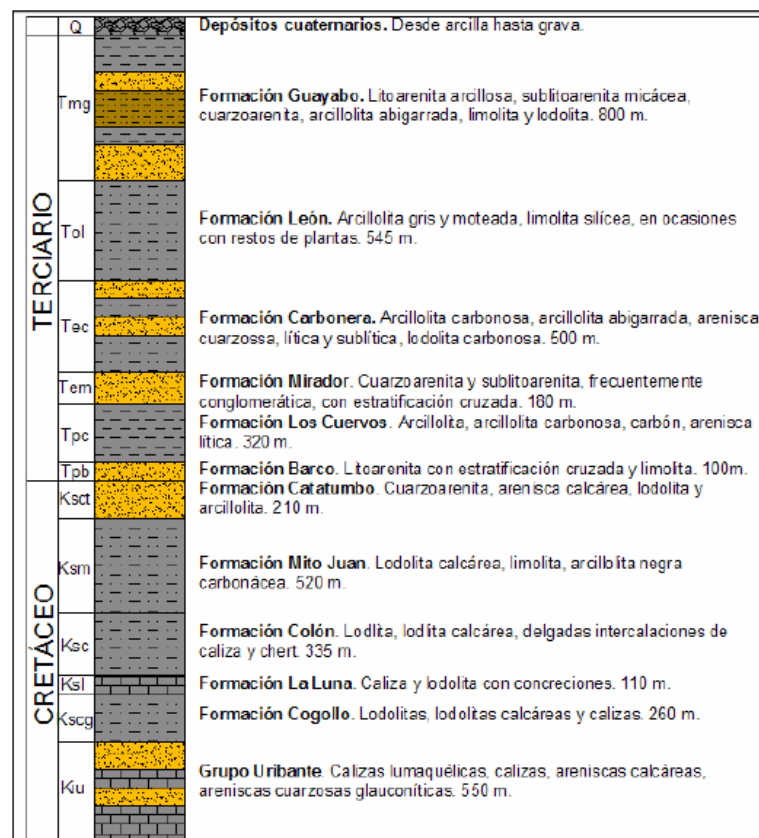


Fig. 9 Columna Estratigráfica generalizada del grupo Uribante, (Sin escala), Tomada de ECOPETROL, 2005

- *Formación Los Cuervos (Tpc)*

El nombre de esta Formación procede de la Quebrada Los Cuervos, afluente del Río Catatumbo, donde tiene su sección tipo. Específicamente se ubica en la vía que conduce a la vereda La Unión, en el Cerro González donde se encuentra en contacto fallado con la Formación Carbonera, tanto al este como al oeste. Al norte se encuentra en contacto normal con la Formación Mirador. Hacia el sur del Cerro González, en el sector conocido como El Tablazo, tiene gran extensión areal y está en contacto concordante con las Formaciones tanto infra como suprayacentes. Hacia el suroriente del Bloque, en el Cerro Tasajero, hace parte del Anticlinal del mismo nombre, en contacto fallado con la Formación Guayabo al este. En estas áreas afloran principalmente intercalaciones de arcillolitas, arcillolitas carbonosas, y mantos de carbón, con capas delgadas de sublitoarenitas micáceas con gran contenido de materia orgánica, dada la continuidad lateral y la calidad de los mantos de carbón, sobre esta formación se ubican numerosas minas de este mineral.

- *Formación León (Tol)*

Su nombre procede de la Quebrada León, afluente del Río Zulia, en la parte oriental del Anticlinal de Petrolea, al NW de Puerto Villamizar. La formación León aflora en la parte noroccidental del Bloque Uribante, haciendo parte del flanco oriental del Anticlinal de González, en contacto concordante con las Formaciones Carbonera y Guayabo; aparece también en la parte occidental del Sinclinal de Zulia como una franja alargada en sentido norte – sur aproximadamente, en contacto concordante con la Formación Carbonera, sin embargo cubierto en algunas partes por los depósitos cuaternarios del Río Zulia. En el flanco sur oriental del Bloque aflora formando el Anticlinal de La Mucurera, con contactos infra y suprayacentes normales; esta unidad también hace parte del Anticlinal de Tasajero siendo cortada en la parte occidental de este por el cabalgamiento que genera sobre ella la Formación Carbonera (Figura 10)

Esta unidad se caracteriza por su granulometría fina, con arcillolitas de colores grises y moteados, limolitas silíceas algunas con restos de plantas y materia orgánica. Pequeñas intercalaciones de lodolitas grises con areniscas sublíticas en capas delgadas y esporádicamente medias son observables en esta Formación aun cuando no predominan en toda el área. Los afloramientos de esta unidad son escasos y frecuentemente alterados. Sin embargo, esta formación es identificable en el terreno por la morfología suave que genera.

- *Formación Carbonera (Tec)*

El nombre deriva de la Quebrada Carbonera, afluente del Río Zulia, en el flanco oriental del Anticlinal de Petrólea su sección tipo se halla 12 km al NW en dicha quebrada en Puerto Villamizar, en el Río Zulia. Es la unidad que mayor distribución tiene dentro del Bloque Uribante, ya que se encuentra en ambos flancos del sinclinal de Zulia, mostrando contactos tanto fallados como normales con las demás unidades del área.

En el flanco occidental hacia el norte se aprecia, en el caserío Remolino, como una cuña que descansa de manera conforme sobre la Formación Mirador y sobre la cual cabalgan las rocas de la Formación Los Cuervos, seguidamente forma un gran faja con dirección norte – sur que atraviesa todo el bloque y que se encuentra al oeste en contacto fallado (Falla Aguardiente) con todas las rocas de la secuencia sedimentaria cretácea.

La litología que representa a la Formación Carbonera en este Bloque son intercalaciones de arcillolitas carbonosas, arcillolitas abigarradas, lodolitas carbonosas y areniscas cuarzosas, líticas y sublíticas; las capas de las litologías mas finas son gruesas mientras que el espesor de la capas de arenisca es de delgado a medio encontrándose esporádicas capas gruesas hacia la base en

contacto con la Formación Mirador; también, aun cuando no es muy frecuente, se hayan capas de calizas y areniscas calcáreas en capas muy delgadas.

Esta Formación posee, al igual que la Formación Los Cuervos, abundantes mantos de carbón, sin embargo, su calidad no es tan alta como la de los ubicados en esta última por lo que es menos frecuente la minería. Genera una morfología escalonada, debido a las intercalaciones que posee diferenciándose de las unidades con que limita. El espesor de esta unidad es de 500 m. Aun cuando no esta bien definida varía de un sitio a otro, la edad de esta unidad y varia de un sitio a otro, se reconoce como Eoceno Medio - Oligoceno Inferior, el cual se discute en la actualidad.

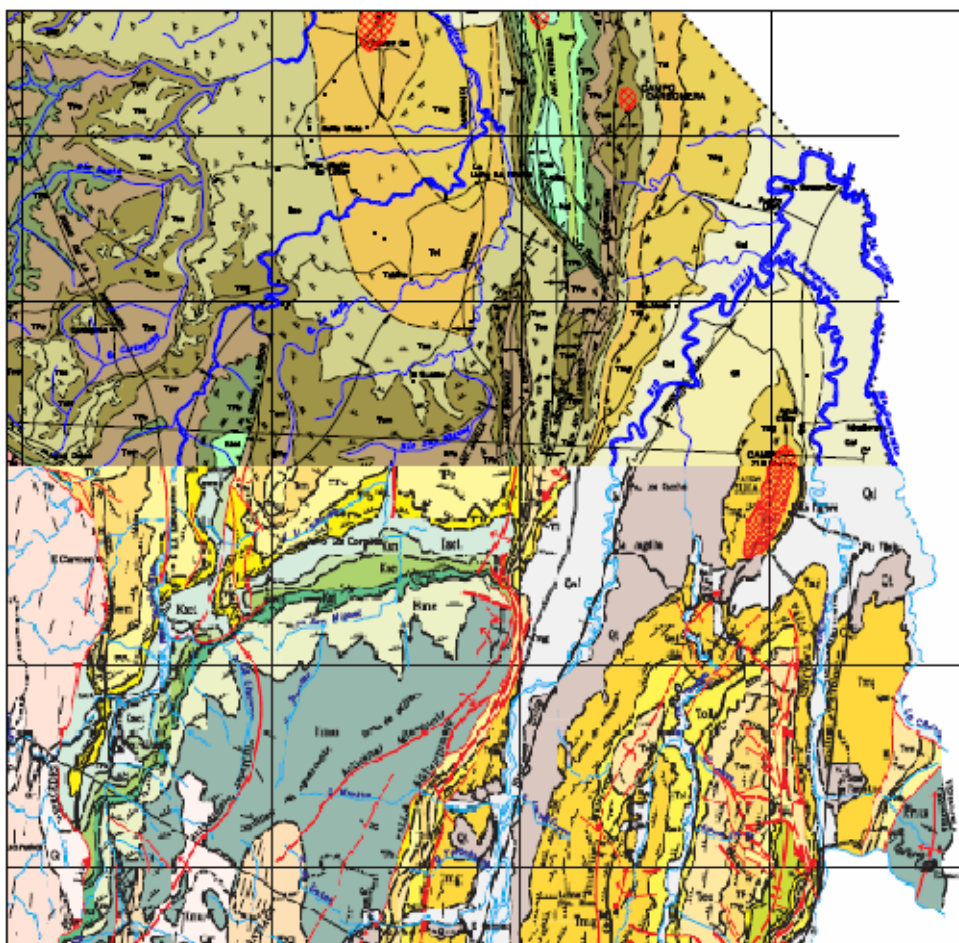


Figura 10, Mapa Geológico de la zona de estudio, G13 y F13 INGEOMINAS

3.3.2 Estructural

El Bloque Uribante se localiza en el extremo mas oriental de la cuenca sedimentaria de del Catatumbo. La parte de esta cuenca que corresponde con el Bloque Uribante, se caracteriza por una serie de pliegues, principalmente anticlinales con ejes de dirección Norte – Sur, y fallas de cabalgamiento también con rumbos preferenciales Norte – Sur pero con buzamientos variados hacia el este y oeste (Figura 10). Las estructuras encontradas en las 2 líneas sísmicas de estudio son las siguientes:

La estructura principal de la zona es el Sinclinal de Zulia, la cual corresponde con un pliegue de dirección NE-SW que se ubica en la parte central del bloque, cuyo núcleo se encuentra cubierto por los depósitos aluviales del río del mismo nombre. A continuación se describirán las distintas estructuras encontradas según el Programa Sísmico de Uribante 2005:

- *Anticlinal de González*

Se encuentra localizado en la parte noroccidental del área de estudio, con dirección preferencial N– S, es una estructura con cabeceo hacia el Sur, truncada hacia el oeste por cabalgamientos sucesivos de las rocas del Terciario.

- *Falla González*

Se extiende cerca del caserío El Remolino, hacia la parte mas noroccidental del bloque, con rumbo NW – SE y buzamiento hacia el este. Hace cabalgar la Formación los Cuervos sobre las rocas de la Formación Carbonera.

- *Falla de Ricaurte*

Localizada en la parte más oriental del bloque, cerca al límite con Venezuela y al corregimiento de Ricaurte. Pone en contacto rocas del Cretáceo Inferior (Grupo Uribante) con rocas del Terciario Superior (Formación León).

3.4 HIDROGEOLOGÍA Y SUELOS DEL ÁREA DE URIBANTE

Para el área del Catatumbo, más específicamente el bloque de Uribante, fue necesario tener en cuenta la división de las cuencas hidrográficas para realizar el estudio hidrogeológico y determinar el tipo de suelo que presenta cada zona localizada en su respectivo uphole. En las cuencas hidrográficas correspondiente a la cuenca del río Zulia se encuentran localizados los upholes 2 y 3 y en la cuenca del río Pamplonita el “uphole” (Figura 12). A partir de mapas de suelos de cada una de estas cuencas, es posible determinar el tipo de suelo que predomina en el lugar teniendo en cuenta la localización exacta del pozo.

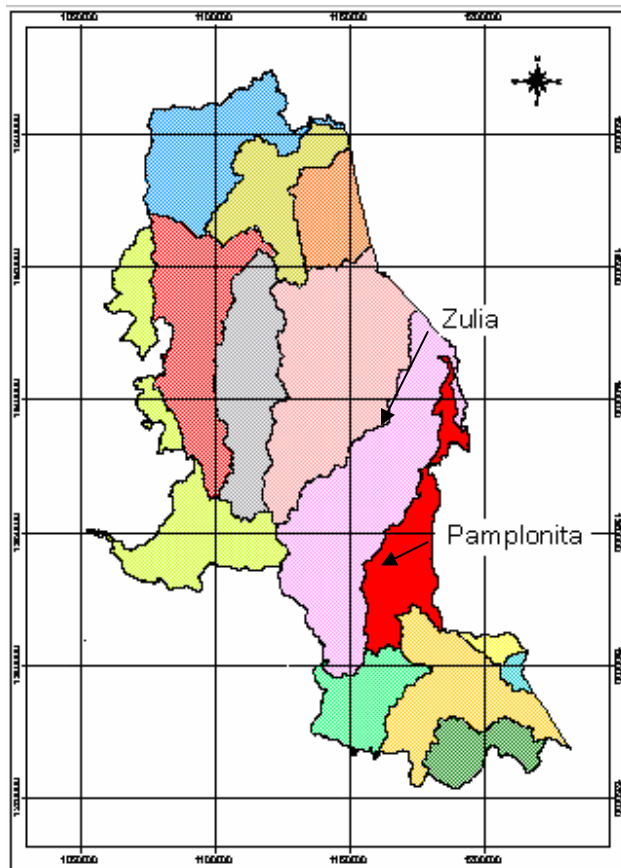


Fig. 12 Localización de las Cuencas del Río Zulia y Pamplonita, Norte de Santander. Tomado de Corporación Autónoma Regional de la frontera Nororienta (Corponor)

La descripción de cada uphole se plasma en una tabla en la cual se simplifica las diferente hidrogeología, geomorfología y tipo de suelo según el informe realizado por CORPONOR, 2006.

	UPHOLE 2	UPHOLE 3	UPHOLE 4
Cuenca	Río Zulia	Río Zulia	Río Pamplonita
Suelo	MVEg1	MVEp1	MVEg2
Temperatura Anual	27-28° C	28-29° C	26-27° C
Clima	Cálido - Húmedo	Cálido-Húmedo	Cálido-Seco
Evapotranspiración (mm)	1800-1900	1100-1200	1000-1100
Precipitación Anual (mm)	1700-1900	1900-200	1900-2000
Relieve	Cresta homoclinal	Lomas	Espinazos
Pendientes	>75%	25-50%	>75%
Bioma	Subxerofítico Tropical	Subxerofítico Tropical	Húmedo Tropical

Tabla 2, Recopilación de datos Geológicos de los upholes localizados en las Cuencas del Río Zulia y Pamplonita, Adaptado, Corporación Autónoma Regional de la frontera nororiental (Corponor)

Teniendo en cuenta en que las muestras geológicas se recolectaron en el mes de enero del 2005, para el uphole 2 la precipitación media mensual corresponde entre 50-60 mm, para el uphole 3 130-140 mm y para el uphole 4 170-180mm, de igual manera la evapotranspiración para el mes de enero en el uphole 2 corresponde a un valor entre 140-150mm para el uphole 3 110-120 mm y para el uphole 4 es de 60-70 mm.

Según la clasificación del IGAC los suelos se distribuyen a partir de su unidad taxonómica y en la cual se organizaron por símbolos teniendo en cuenta la descripción de cada uno, así se definió una tabla significativa recopilando toda esta información teniendo en cuenta su unidad taxonómica, símbolo, unidad cartográfica y área (IGAC, 2004)

Uphole 2	MVEg1	Lithic Troorthents	Superficiales, limitados por roca, bien drenados, de textura franco arenosa. Fertilidad natural baja.
Uphole 3	MVPe1	Typic Dystropepts	Profundos, bien drenados, textura arcillosa. Fertilidad natural baja.
Uphole 4	MVEg2	Lithic Troorthents	Superficiales, limitados por roca, bien drenados, de textura franco arenosa. Fertilidad natural baja.

Tabla 3, Descripción de Suelos, Tomado de IGAC 2004

4. ANÁLISIS GEOLÓGICO

El análisis geológico se basó en información previa provista por el Programa Sísmico Uribante 2005 para Ecopetrol en la adquisición y recolección de muestras. Esta información y las muestras en rípios traídas de campo fue la base para el estudio de investigación sobre la capa somera en el área de Uribante el cual lleva tanto análisis geológicos macroscópico, microscópico y detección de minerales arcillosos y óxidos provisto por métodos de difracción de rayos x que se describirán a continuación.

4.1 DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS EN RIPIOS

El análisis de rípios fue fundamental para poder trazar los horizontes y así determinar que es suelo y que es roca. La descripción de rípios siguió una metodología para recoger de una forma ordenada la mayor información posible de la litología, además de determinar cuales rípios son caídos los cuales no se tuvieron en cuenta para la elaboración del perfil. Los intervalos de muestreo utilizados fueron cada 5 metros empezando desde 1 metro, 5 metros, 10 metros, así, hasta llegar a los 60 metros, analizándose de esta manera para llevar mejor un control de cambio de litología. Para su análisis fue necesario llevar una metodología para así poder analizar y determinar sus componentes litológicos en dos pasos: descripción de la forma, tamaño y distribución del fragmento y descripción de textura y composición de cada fragmento. La metodología que se siguió fue la siguiente:

1. Inventario de las muestras.

El inventario se realizo para llevar el control de las muestras entregadas y poder realizar de forma más organizada la descripción de las mismas.

2. Lavado de las muestras.

En el laboratorio de muestras del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP), se hizo el lavado de las mismas para poder extraer el lodo de perforación y otros elementos ajenos que se encontraban y el secado se realizo a una temperatura el cual pudiera succionar toda la humedad presente sin perder o alteras el contenido mineral existente.

3. Revisión Bibliográfica.

Se recopiló información de las unidades presentes en el sitio de cada pozo, principalmete del informe de Cartografía geológica del programa de Uribante 2005 dispuesto para Ecopetrol y por el manual de petrografía de Cruz y Caballero 2005.

4. Análisis macroscópico de las muestras.

En las lupas estereoscópicas marca Wild M5A N1-150 y con un aumento de 12X, del laboratorio de petrografía del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP) se analizaron las muestras uno a uno las muestras teniendo en cuenta su color, reacción al agua y al acido clorhídrico, su textura y tamaño de grano. Seguido se determino la litología presente para cada profundidad en cada pozo.

▪ Uphole 2

El análisis de este pozo correspondió en los primeros metros a minerales de tonos amarillos y rojizos principalmente (Figura 14) que corresponden a un producto de alteración por el interperismo que ocurre tanto en superficie como en el subsuelo, a medida que la profundidad aumenta su coloración disminuye tornándose a tonos

grises correspondientes a la formación. La litología encontrada corresponde a arcillas y arenas de la formación cuervos, fragmentos de pirita, contenido de materia orgánica y buen contenido de fragmentos carbonosos se observaron a través de toda la profundidad. Entre los fragmentos de arena se encontró entre el contacto de sus granos material bituminoso (Figura 15) en una muy buena cantidad en todas las profundidades siendo mayor en porcentaje en los primeros 40 metros, posiblemente este se dio producto de un resumadero existente. Este pozo se encuentra muy cercano al pozo Gonzáles 1 de la Empresa ECOPEPETROL. En resumen el análisis de esta muestra se muestra en la siguiente tabla:

	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ARCILLOLITA-ARENITA ARENOSA	63	53	30	10	20	20	22	20	15	8	10	8	8
ARCILLOLITA ARENITA	7	7	20	60	45	60	53	55	65	77	85	86	82
CARBÓN	0	10	5	5	15	0	0	0	0	0	0	0	5

Tabla 4 Litología en porcentajes del Uphole 2

Los valores de cada profundidad suman el 100% en las distintas litologías encontradas en cada nivel, las arcillolitas-arenitas arenosas corresponden a la litología que presentaba tonos amarillos y rojizos que corresponde a minerales alterados, la arcillolita y arenita corresponde al material intacto que se encontró en cada profundidad.

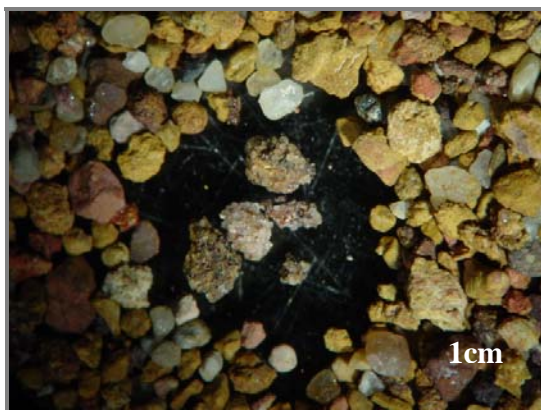


Fig. 12 Muestra en ripios del Uphole 2 1 metro de profundidad, Formación Cuervos



Figura 13, Muestra en ripios, Uphole 2 55 metros de profundidad, Formación Cuervos



Fig. 15 Fragmento de Arenisca impregnda de bitumen del Uphole 2, 15 metros de profundidad, Formación Cuervos

▪ **Uphole 3**

La litología correspondiente a este pozo es de arcillolitas grises de forma irregular principalmente, la litología observable de tonos rojizos y amarillos corresponden a minerales arcillosos y arenosos alterados por procesos de meteorización y se presentan de forma irregular para los primeros metros las arenas presentan una matriz arcillosa de un 80%. Estas arcillas se encuentran intercaladas con niveles menores de areniscas y se encuentra caracterizada por tener contenidos de materia orgánica y fragmentos de pirita. A partir de la profundidad de 35 metros se observaron unas venillas de calcita y sílice en las arcillolitas grises en poca cantidad. Los porcentajes correspondientes a las distintas litologías encontradas son las siguientes:

	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Arcillolita- Arenita Arenosa	65	78	68	20	18	20	10	16	23	12	0	0	8
Arcillolita	20	14	10	72	68	80	85	75	68	80	100	100	92
Arenita	15	8	22	8	14	0	5	9	9	8	0	0	0

Tabla 5, Litología en porcentajes del Uphole 3

- Uphole 4

El material encontrado en este pozo corresponde limolitas y arcillolitas de tonos grises, gris amarillentas a grises rojizos, localmente ferruginosos que corresponde a los primeros metros y algunas arcillas micáceas. Las intercalaciones son de areniscas de cuarzo, blancas y grises, grano fino y medio, ligeramente lodosas, micáceas, localmente feldespáticas, con óxidos de hierro. La presencia de mantos de carbón en este pozo es abundante principalmente a partir de la profundidad de 40 metros. Los porcentajes de las distintas litologías encontradas se representan a continuación:

	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Arcillolita-Arenita Arenosa-Limoarenoso	65	53	40	27	23	25	26	23	18	16	17	15	15
Arcillolita	25	8	27	33	47	40	48	35	32	41	45	47	42
Limonita	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Arenita	5	36	28	30	18	20	11	12	4	10	18	18	21
Carbon	0	0	5	10	12	15	15	30	46	33	20	20	22

Tabla 6, Litología en porcentajes del Uphole 4

4.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

El análisis de difracción de rayos x se realizó para determinar con exactitud los minerales existentes en estas muestras. El laboratorio de Difracción de Rayos X del instituto Colombiano de Petróleo realizó este para una fracción no mayor a 2 micras y siguiendo el respectivo manual de Laboratorio.

Este análisis se realizó bajo dos modalidades: roca total en montaje desorientado y fracción menor de 2 μm en montajes orientados.

El análisis de roca total se llevó a cabo sobre la muestra pulverizada manualmente en mortero de ágata, sin ningún tratamiento químico. Este análisis

detecta los componentes mayoritarios a nivel del armazón de la roca, permitiendo además establecer los tratamientos que se requieren en la separación de la fracción menor de 2 μm , para la caracterización de los minerales de arcilla. La separación de la fracción fina se realizó por centrifugado (Norma ASTM C 775-79. Inicialmente las muestras pasan por un proceso de disgregación y dispersión con ultrasonido, se eliminan cementantes y la materia orgánica lo cual permite obtener la cantidad de arcilla necesaria para los diferentes tratamientos (Informe de Resultados de Análisis Mineralógico, ECOPETROL 2007).

La metodología seguida por el laboratorio de DRX del Instituto Colombiano de Petróleo ECOPETROL, consta de tres pretratamientos iniciales para identificar los grupos principales de arcillas presentes:

N = Normal, la arcilla suspendida en agua se deja secar para permitir que los planos basales de las arcillas se acomoden libremente y obtener un espectro de DRX orientado.

C = Etilen Glicolada, moléculas orgánicas ocupan las posiciones interlaminares de las Esmectitas para aumentar las distancias basales (hinchamiento. Identifica el grupo Esmectítico.

F = Calentamiento de la muestra a 550° C, Destruye la estructura cristalina de las Caolinitas. Permite la diferenciación del grupo Caolinitas-Cloritas y algunos interestratificados.

Antes y después de cada tratamiento se realiza un análisis de la muestra y finalmente se superponen todos los difractogramas para definir la composición real, haciendo énfasis en los compuestos mayoritarios, es decir los que conforman alrededor del 95 % de la muestra arcillosa.

Los espectros fueron obtenidos en un Difractómetro computarizado, marca Siemens, D4, equipado con lámpara de Cu y monocromador de grafito. La

evaluación de los espectros se realizó con ayuda del Software Diffrac – AT y Diffrac Plus de la firma Siemens, con base en los patrones de la JCPDF, comercializados por el ICDD1.

Los porcentajes expresados en los diferentes cuadros, para la roca total y para la fracción arcilla, están basados en un estudio semicuantitativo considerando la altura de los picos principales, el área bajo la curva y el poder de reflexión que los diferentes minerales poseen con respecto a los rayos X (definidos en nuestro laboratorio²). Esta metodología calcula la **fracción en peso** de cada componente. Es importante tener en cuenta este aspecto ya que otras técnicas petrográficas proporcionan porcentajes composicionales con base en el área observada, incluyendo además porosidad de la roca. Se toma como 100% el total de las fases detectadas por el difractómetro. El material orgánico presente, así como los cementos y compuestos amorfos que también constituyen parte de la roca, al igual que la porosidad, no se cuantifican por esta técnica. Solo el material cristalino difracta los rayos X (ECOPETROL 2007).

Resultados DRX Uphole 2

De acuerdo con el análisis de roca total, el principal componente del armazón de las rocas estudiadas es Cuarzo con concentraciones variables de arcillas que van del 12% hasta el 38%. Como minerales accesorios se encuentran Feldespatos Potásicos y Sódicos, Pirita, Hematita, Carbonatos tipo Siderita y Calcita, Óxidos de Hierro tipo Goetita y Óxidos de Titanio tipo Anatasa en concentraciones que no superan el 5% (Anexo 4) (ECOPETROL 2007).

El análisis de la fracción menor de 2 micras mostró como mineral arcilloso predominante Caolinita acompañado de micas tipo Illitas y Cuarzo microcristalino. Adicionalmente en algunas muestras se observó la presencia de

Interestratificados glauconíticos con capas illíticas. En la profundidad de 25 m se encontró bajo contenido de Cloritas ferrosas tipo Chamosita (ECOPETROL 2007).

Resultados DRX Uphole 3

De acuerdo con el análisis de roca total, las muestras de este pozo presentan altos contenidos de minerales de arcilla que van del 25 al 56% de concentración, a excepción de las tres primeras muestras (1-10 m) cuyos contenidos no superan el 13% en peso de la muestra total. El Cuarzo constituye alrededor del 40-80% en peso de la muestra total. Los carbonatos tipo Dolomita y Siderita se encuentran en todas las muestras estudiadas que no superan el 2% en peso. Entre los minerales accesorios se encuentran Pirita, Feldespatos potásicos y sódicos, Carbonatos tipo Siderita y Dolomita y Óxidos de Titanio tipo Anatasa con porcentajes que no exceden al 10% en peso de la muestra total (Anexo 5) (ECOPETROL 2007).

En la fracción menor de 2 micras, el componente mayoritario es la Caolinita que corresponde alrededor del 50% en peso, a su vez esta fracción presenta altos contenidos de Illitas que en parte se encuentran alteradas por capas esmectíticas revelándose interestratificados tipo Illita/Smectita. Acompañando a estos minerales se encuentran Cloritas y Cuarzo microcristalino (ECOPETROL 2007).

Resultados DRX Uphole 4

La composición mineralógica a nivel de roca total corresponde principalmente a Cuarzo y minerales de arcilla. La mayor concentración de arcilla representa el 25% y de Cuarzo el 80%. En baja proporción y a nivel de trazas se encontró Pirita, Anatasa, Barita, Carbonatos tipo Siderita y Feldespatos potásicos y sódicos (ECOPETROL 2007).

El análisis de la fracción menor de 2 micras mostró como mineral arcilloso predominante Caolinita acompañado de micas tipo Illitas, Interestratificados Illita/Smectita y Cuarzo microcristalino. Adicionalmente se observó la presencia de

Cloritas ferrosa en baja proporción. Los interestratificados que representan entre 6 y el 35% en peso de la fracción arcilla revelan en la mayoría de las muestras una estructura irregular y carácter micáceo lo cual los hace minerales poco hinchables (ECOPETROL 2007).

En general, los minerales dominantes de las muestras fueron Cuarzo y minerales de arcilla; estos minerales enmascaran otras fases cristalinas presentes en menor proporción, de baja cristalinidad los cuales se agrupan como “Otros” en la tabla 2, en nuestro caso corresponden principalmente a Hematita y Goetita (Anexo 6). En este caso, el lodo de perforación no contribuyó en la composición mineralógica encontrada de las muestras estudiadas.

4.3 COLUMNAS LITOLÓGICAS

Las columnas se elaborarán con el fin de plasmar la información determinada a partir del análisis macroscópico de las muestras y para correlacionar con las velocidades obtenidas por Rueda 2007, esto para llegar a una conclusión del por que el cambio de las velocidades en el estrato somero. Del análisis realizado cada 5 metros hasta llegar a los 60 metros, se tuvo en cuenta los minerales secundarios que se encontraban en cada profundidad, ya que estos son claves para la determinación de las variaciones de velocidades.

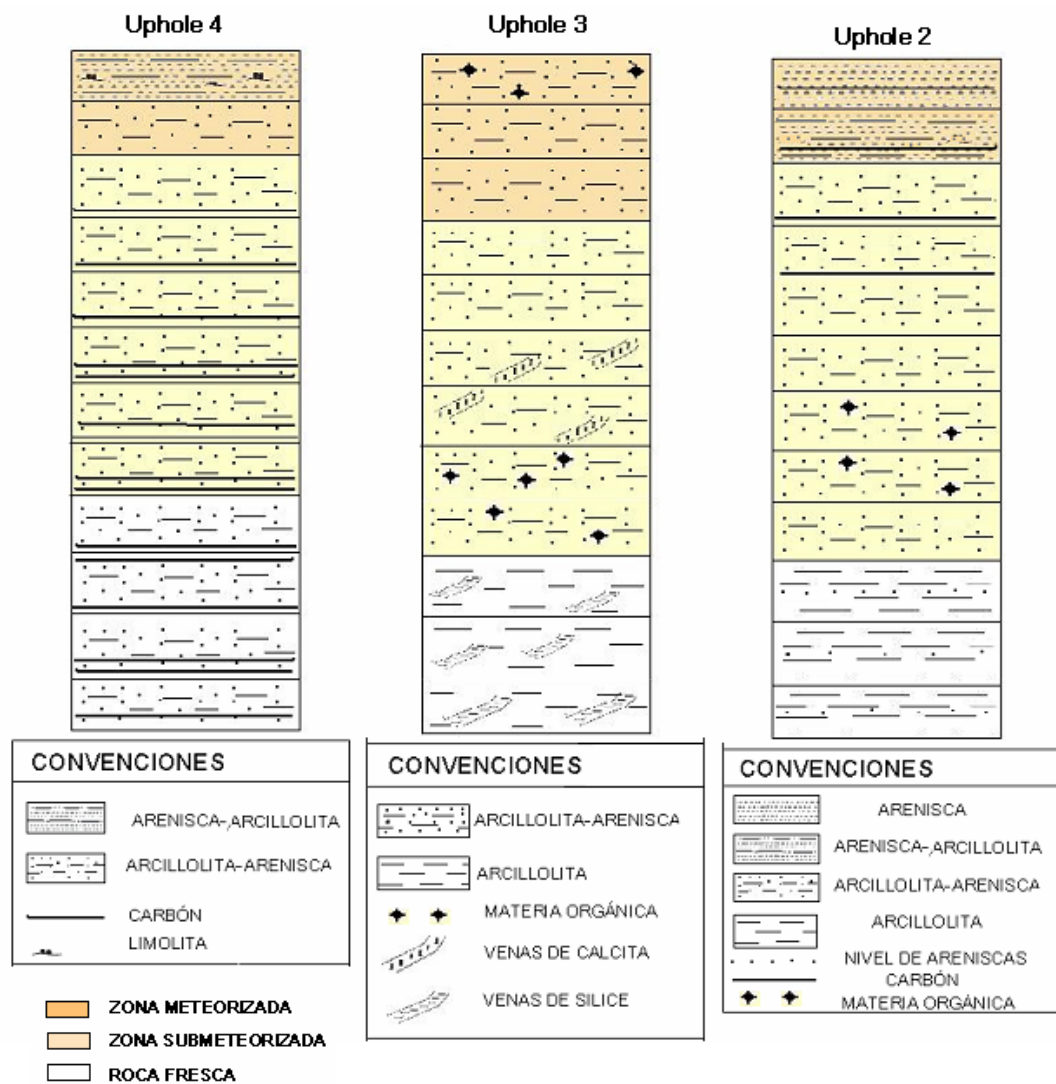


Fig. 15, Columna de los Upholes 2,3 y 4

4.4 ANÁLISIS DE MUESTRAS DE SUELOS

Las muestras de suelos se recolectaron en agosto del año 2007, visita que se realizo nuevamente a la zona de estudio para conseguir información en CORPONOR (Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororienta) sobre

los datos hidrogeológicos y de suelos de la región, seguido de esto fue necesario ir a la zona específica donde se perforaron los Upholes para corroborar la topografía y recolectar muestras de suelos y realizar unos ensayos de permeabilidad. Los análisis fueron los siguientes:

Ensayo de Permeabilidad

La permeabilidad de los distintos horizontes del suelo se puede evaluar mediante el estudio visual de determinadas características del suelo, en campo se realizó este ensayo para una capa no mayor en profundidad de 40 cm y un ancho de 10 cm para los tres uphole se realizaron colocando una referencia el cual mide el tiempo tras ir descendiendo el nivel del agua hasta que el pozo quedara totalmente seco (ver figura). Los resultados fueron los siguientes:

- Para el Uphole 2 la velocidad de infiltración fue lenta perteneciente a una columna de agua saturada
- El uphole 3 la velocidad de infiltración fue rápida perteneciente a una columna de agua no saturada
- El uphole 4 la velocidad de infiltración fue lenta perteneciente a una columna de agua saturada

Muestras de Suelos

Se realizaron análisis de plasticidad y humedad en el laboratorio de Suelos de la Universidad Industrial de Santander para los suelos de los pozos 2, 3 y 4 con muestras recolectadas a una profundidad no mayor de 40 cm. Estos análisis se realizaron con el fin de caracterizar el comportamiento de los suelos según los límites de Atterberg o límites de consistencia. El procedimiento fue el siguiente:

De cada muestra de suelo se tomó una fracción de material fino tamizándose por una malla número 80, se le adicionó cierta cantidad de agua para humedecer y así formar con la mitad de la muestra rollitos con un espesor no mayor de 3 mm, para determinar el límite plástico, y con la muestra restante se esparció en la

copa de un aparato llamado casagrande, este con el fin de determinar el limite liquido a partir de un determinado numero de golpes que se den hasta que la muestra esparcida y cortada por la mitad se una a partir de estos golpes.

Al final se prosigue con la toma de datos y los pesos de cada una de las muestras. Los resultados fueron los siguientes:

L.L.	No. Golpes	W agua	Wsuelo seco	Conte. Agua	Humedad
	49	1.4	3.8	36.84	5.2
	15	3.4	7.8	43.59	11.2
L.P	W agua	Wsuelo seco	Conte. Agua	Humedad	
	0.2	0.9	22.2	1.1	
	0.2	1	20	1.2	
	0.1	0.8	12.5	0.9	

Tabla 7, Datos de limite liquido y limite plástico del uphole 2

L.L.	No. Golpes	W agua	Wsuelo seco	Conte. Agua	Humedad
	44	1.2	3.4	33.22	4.8
	22	3.6	6.8	42.12	12.8
L.P	W agua	Wsuelo seco	Conte. Agua	Humedad	
	0.3	9.8	31.6	2.2	
	0.3	10.8	33.5	2.4	
	0.3	10.6	30	2.2	

Tabla 8, Datos de límite liquido y limite plástico del uphole 3

L.L.	No. Golpes	W agua	Wsuelo seco	Conte. Agua	Humedad
	30	2,4	10,5	22,85	12,9
	17	3,4	14	24,28	17,4
L.P.	W agua	Wsuelo seco	Conte. Agua	Humedad	
	0,5	2,4	20,83	2,9	
	0,5	2,4	20,83	29	
	0,4	2	20	2,4	

Tabla 9, Datos de límite líquido y límite plástico del uphole 4

Para determinar el tipo de suelo por este método, los valores resultantes se grafican en la carta de plasticidad del sistema Unificado de clasificación de suelos (ver anexo) determinando el índice plástico y el índice líquido. La determinación del índice plástico se realiza con la resta del Límite líquido menos el límite plástico, y para los valores del límite líquido y plástico se determino la media de los valores del contenido de humedad, los valores para los tres casos fueron los siguientes:

UH3	UH3	UH4
L.L.= 43	L.L.= 43	L.L.= 23,12
L.P.= 31.5	L.P.= 31.5	L.P.= 20,55
I.P.= 11.5	I.P.= 11.5	I.P.= 2,57

Tabla 10 Valores del límite líquido, límite plástico e índice plástico de los tres uphole

Según esta clasificación el tipo de suelo para los tres Upholes son:

- Uphole 2 pertenece a suelos tipo CL, suelos de arcillas arenosas de baja a media plasticidad.
- Uphole 3, suelos tipo OL, Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
- Uphole 4, suelos tipo ML, suelos arenosos ligeramente plásticos.

4.3 ANÁLISIS DE LA DESCRIPCIÓN DE SECCIONES DELGADAS

En el laboratorio de muestras el Instituto Colombiano de Petróleo se mandaron a realizar 9 secciones delgadas para las muestras en rípios de los tres upholes con el fin de evaluar visualmente la porosidad de las arenas y determinar la geometría que tienen estos poros. Estas láminas se elaboraron a partir de tinción roja como fondo para determinar mejor estas porosidades a partir de fluorescencia (Figura 17).

Los valores de porosidad se estimaron visualmente según las tablas de y para la geometría de determino la cantidad de formas esféricas que corresponde a un aspect ratio de $1 - 0.1 - 0.01$, donde 1 corresponde a una forma esférica o donde del eje mayor y menor corresponden al mismo valor, ovaladas que corresponden a un aspect ratio de 0.1 en el cual sus ejes son desiguales y en forma de penny-cracks o fracturas que son los poros que se encuentran interconectados y su valor de aspect ratio es igual a 0.01. Los datos fueron los siguientes:

Para el uphole 2, las arenas corresponden a una porosidad observada del 8% para la primera capa que corresponde a la capa meteorizada de espesor de 1 metro a 10 metros, para la segunda capa el espesor corresponde de 15 metros a 40 metros con una porosidad observada de 10% y para la tercera capa o roca intacta a partir de los 45 metros hasta los 60 metros una porosidad de 8%. Hay que tener en cuenta que estas porosidades son aproximadas y se esta despreciando la porosidad de la arcilla, ya que para estos análisis solo se realizan para las arenas.

Para el uphole 3 la porosidad observada para la primera capa de 1 metro a 10 metros corresponde a un valor de 6%, para la segunda capa de 15 metros a 40

metros una porosidad de 8% y para la tercera capa de los 45 a los 60 metros una porosidad de 8%.

Para el uphole 4 la porosidad observada para la primera capa de 1 metro a 10 metros corresponde a un valor de 12%, para la segunda capa de 15 metros a 40 metros una porosidad de 10% y para la tercera capa de de 45 metros hasta los 60 una porosidad de 7%.

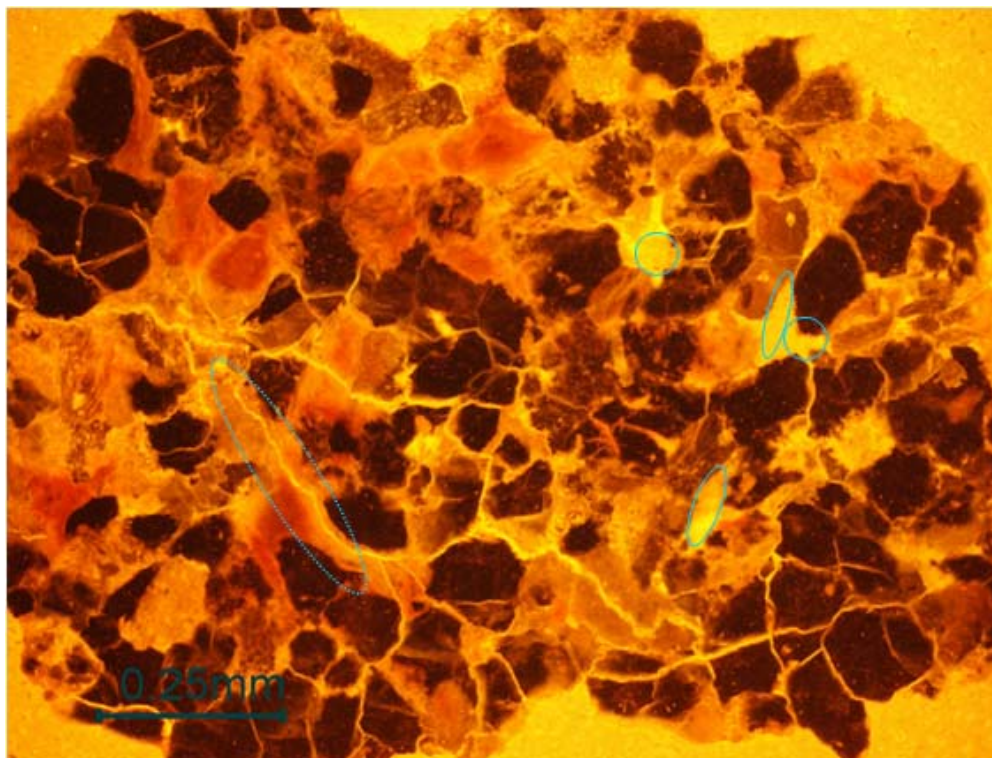


Fig. 16, Sección delgada de arenita en fluorescencia roja, Muestra en ripio uphole 4, 1 metro de profundidad.

Los valores estimados en concentración para cada geometría de poro para los tres upholes correspondieron a la siguiente tabla:

	UPHOLE 2	UPHOLE 3	UPHOLE 4
CAPA 1	67 – 17 - 16	78 – 12 - 10	30 – 46 - 26
CAPA 2	68 – 22 –10	86 – 12 - 2	79 -21
CAPA 3	54 - 46	88 - 12	40 - 60

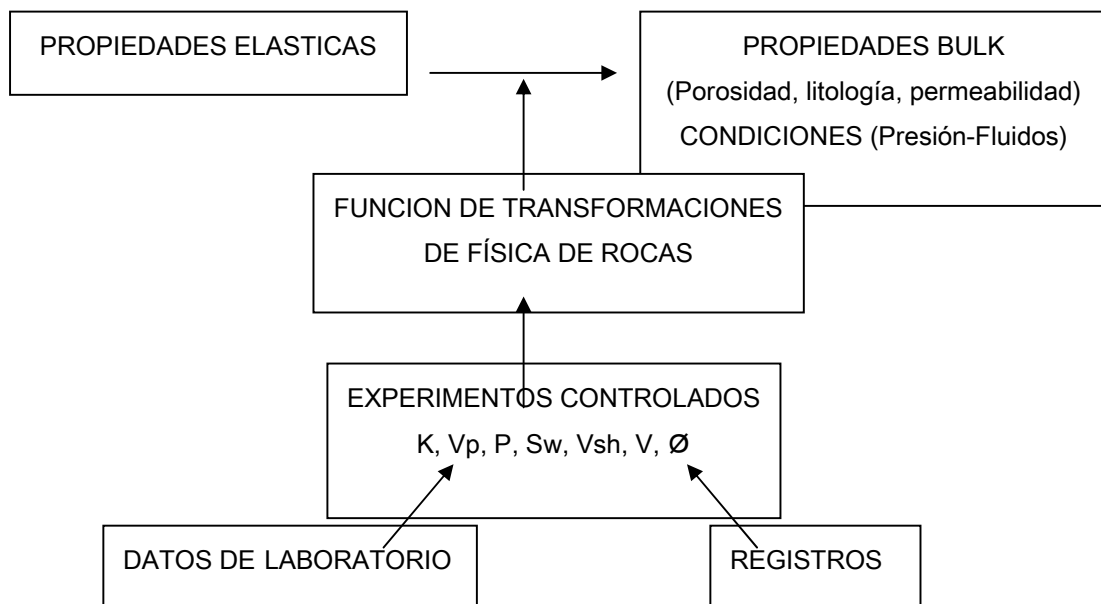
Tabla 11 Valores de aspect ratio en concentración para los tres upholes en las distintas capas.

Donde el primer valor corresponde a un aspect ratio de 1, el segundo valor corresponde a un aspect ratio de 0.1 y el tercer valor corresponde a un aspect ratio de 0.01.

5. MODELAMIENTO 2D

5.1 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS POROELÁSTICOS, TEORIA DEM

La misión de física de rocas es relacionar las velocidades con las propiedades de reservorio (Dvorkin, 2003), un ejemplo de esto son las velocidades sísmica hacia la porosidad. El acercamiento más simple a esto es compilar una serie de datos de laboratorio, relevante al sitio bajo investigación, donde la velocidad y la porosidad en este caso son características de estos datos. La resultante de estas velocidades y porosidades puede ser aplicada a las velocidades sísmicas o mapear esto en conjunto con la porosidad. El esquema a continuación representa la misión de la física de rocas (Adaptado a Norsar) Dvorkin:



(Donde K es permeabilidad, V_p es velocidad de onda P, P es presión, S_w es saturación de agua, V_{sh} es V_{shale} , V es el volumen y ϕ la porosidad)

Este diagrama explica como a partir de distintos datos puedo crear un modelo con propiedades elásticas a partir de experimentos de física de rocas.

Teoría del Medio Efectivo

Para elaboración de un modelo de roca con propiedades tanto físicas como geológicas conlleva a un análisis profundo sobre los parámetros volumétricos, módulos elásticos y el tipo de fluido por el cual se propaga la velocidad. Estos se encuentran influenciados por la matriz de la roca, el espacio poroso y la forma que estos tienen por el cual circula el fluido. El modelo de medio efectivo tiene el potencial de capturar el efecto de las geometría de poros sobre las propiedades acústicas, esta teoría se escogió para este trabajo a realizar ya que tiene en cuenta la forma de estos poros que, por pruebas realizada en laboratorio, han demostrado que tienen un valor importante en la determinación de velocidades de propagación de ondas en el modelo de roca. (Baechle G. et al, 2007)

Por varias razones, es necesario ser capaz de modelar o estimar módulos elásticos efectivos de roca en términos de las propiedades de varios constituyentes minerales y poros de los fluidos. Para hacer esto exacto, es necesario incorporar varios factores: Módulos individuales elásticos de los constituyentes, la fracción de volumen individual de cada constituyente y los detalles geométricos de estos constituyentes. Estos detalles geométricos son los más difíciles de conocer o caracterizar. Si se ignora la geometría, se podría entonces estimar los límites superiores e inferiores sobre estos módulos (Mavko G. 1997).

5.1.1 Medio Efectivo Diferencial (DEM)

Esta teoría consiste en un modelo teórico que se compone de dos fases, una constituye la matriz de roca y una segunda fase de inclusión que se considera el fluido. Para múltiples constituyentes, el modulo efectivo depende no sólo de la

fracción del volumen final de los constituyentes sino también del orden en el cual la el volumen de la inclusión aumenta. Por ejemplo si se tienen dos inclusiones de material 1 y material 2, incrementar el porcentaje del material 1 primero y posteriormente el del material 2 no da en general lo mismo que hacerlo en el orden contrario. El proceso de incrementar el volumen de las inclusiones en una matriz de roca es un experimento mental que no proporciona una descripción exacta de la evolución verdadera de la porosidad de una roca en la naturaleza.

Porosidades Críticas

Raymer et al (1980), reconoce el concepto de dominios de porosidades separados en los cuales las velocidades exhiben distintos comportamientos. El dominio de suspensión en rocas de altas porosidades describe un medio donde las partículas sólidas están suspendidas en el fluido. El dominio de las rocas consolidadas de baja porosidad describe un medio con una matriz soportada. La porosidad crítica divide la transición de la relación entre la velocidad y la porosidad entre los dos dominios. Para valores por debajo de la porosidad crítica, la velocidad depende fuertemente sobre la porosidad y se incrementa significativamente con una pequeña disminución en la porosidad (Nur et al, 1995) (Figura 17).

5.1.2 Modelos elipsoidales para deformación de poros

Los elipsoides generados a partir de la deformación del poro son causados varias veces por los distintos esfuerzos a los cuales se encuentra sometida la roca a diversas profundidades. Estos elipsoides pueden tener formas esféricas ($\gamma = 1$), ovaladas ($\gamma = 0.1$), o como elipsoides muy alargados ($\gamma = 0.01$) que pueden aproximarse a la forma de cracks (fracturas). El *aspect ratio* (Fig.18) es la relación entre el ancho y el largo del poro y es la manera más sencilla para describir diferentes combinaciones de la geometría de los poros de una muestra.

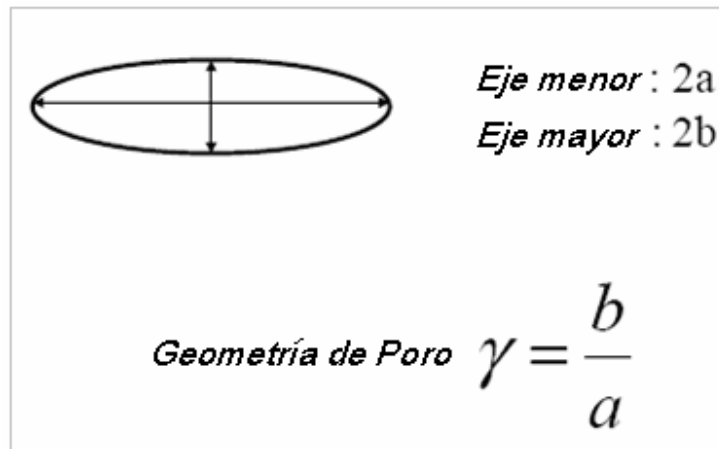


Fig.17, Modelo de aspect ratio, tomado de mavko 1997

5.1.3 Limites de Voight y Reuss

Si se desea predecir teóricamente el modulo elástico efectivo de un mezcla de granos y poros, generalmente se necesita una fracción de volumen de varias fases, un modulo elástico para estas fases y una geometría detallada el cual las fases son arregladas relativamente a cualquier otra (Mavko 1996).

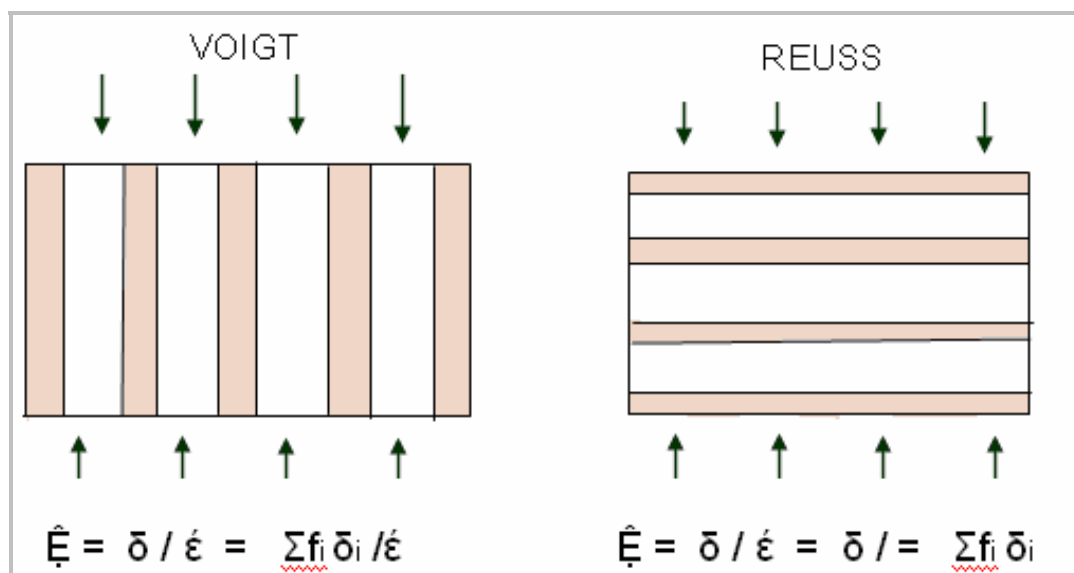


Fig. 18 Modelos de iso-deformación (voigt) y de iso-deformación (reuss), Tomado de Mavko 1996.

El límite de Voigt es llamado también límite de iso-deformación ya que tiene un coeficiente de esfuerzo promedio sobre la deformación promedio, cuando todos los constituyentes son sometidos a una misma deformación (Figura 20). Generalmente este límite de voigt marca las velocidades máximas al estar la roca compacta y por ende corresponde a bajas porosidades. El límite de reuss es llamado como iso-esfuerzo, por que tiene un limite de coeficiente de esfuerzo promedio sobre la deformación promedio, esto cuando todos los constituyentes son asumidos con un mismo esfuerzo, este último resulta muy exacto para suspensiones sean en agua o gas (Figura 20), con un modulo de corte igual cero y con un modelo de mezcla de varios materiales (Mavko 1996).

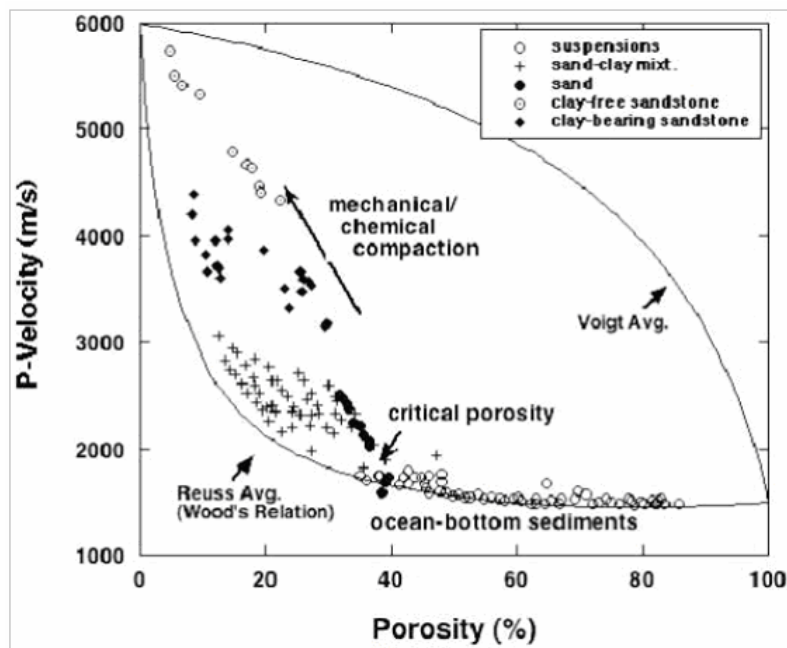


Figura 19 Velocidad de onda versus porosidad mostrando los límites voigt y reuss para sedimentos saturados con agua, Yin (1992), Han (1986) and Hamilton (1956).

5.2 MODELAMIENTO EN EL SOFTWARE 2D

Se realizó un modelo en un software comercial “Norsar” para cada uno de los tres uphole con el fin de integrar parámetros petrofísicos con un modelamiento sísmico y observar la variación que presenta a partir del trazado de rayos y los sismogramas generados. Inicialmente se realizó un modelo de cada una de los perfiles pertenecientes a los pozos cada bloque representa las formaciones presentes, y luego se realizó el modelo del uphole 1D representando las tres capas diferenciables de sector meteorizado, submeteorizado y roca intacta. Seguido de esto se integró con una base de datos elaborada en Velrock para asignar las propiedades de velocidad de onda P-S y densidad y para finalizar se realizó el trazado de rayos para cada pozo teniendo en cuenta en que se realizó para un VSP ya que es un pozo donde los receptores se encuentran en la vertical y la fuente sobre la superficie.

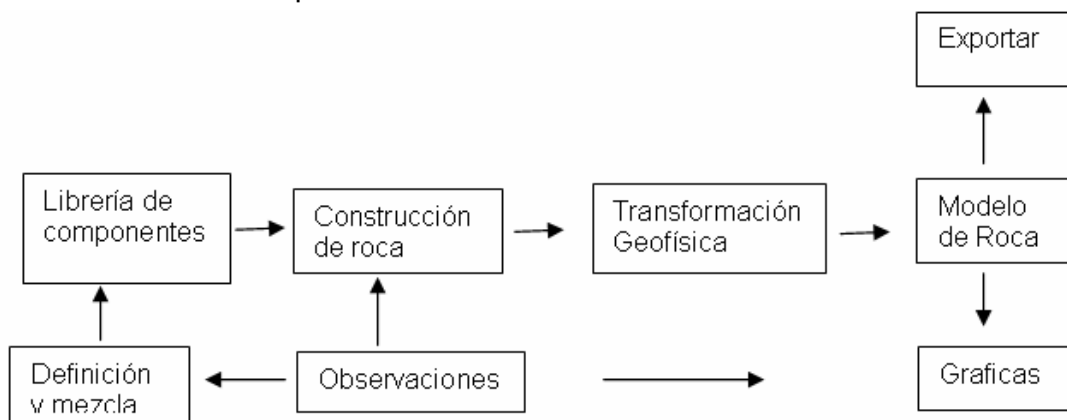


Fig. 21 Diagrama de componentes para la elaboración de un modelo de roca

Este flujo nos muestra los diferentes componentes a tener en cuenta en la realización de un modelo a capas y la integración de las propiedades de roca a tener en cuenta en cada capa del modelo. Se calculan las características sísmicas

de cada capa usando características de la roca tales como saturación y litología fluidos de la porosidad.

5.3 PARÁMETROS PETROFÍSICOS

Velrock es un modulo del software Norsar que hace link entre las propiedades de roca y la sísmica prediciendo como la litología y las propiedades del reservorio influyen en los parámetros sísmicos. Los parámetros que se tomaron en cuenta durante el modelamiento fueron la litología, saturación, porosidad geometría de poros.

Este software dispone de dos tipos de modelo de roca: un modelo macro y un modelo micro. El modelo macro, es bastante simple y sólo permite utilizar materiales consolidados o no consolidados en los cuales basta con propiedades de contenido de arcillas, saturación y porosidad para calcular la velocidad de onda P-S. El modelo micro, es mucho más detallado permitiendo cargar tablas de propiedades tales como tipo de litología, tipo de saturación, porosidad, presión de poros, geometría de poros y permite integrar más de 2 tipos de materiales (Figura 22).

El modelo de roca puede tener acceso a librerías preestablecidas de parámetros físicos para rocas comunes, pero estos también pueden ser definidos por el usuario, la designación de un modelo de roca incorpora conocimientos acerca de los parámetros geológicos con escalas macroscópicas y/o microscópicas.

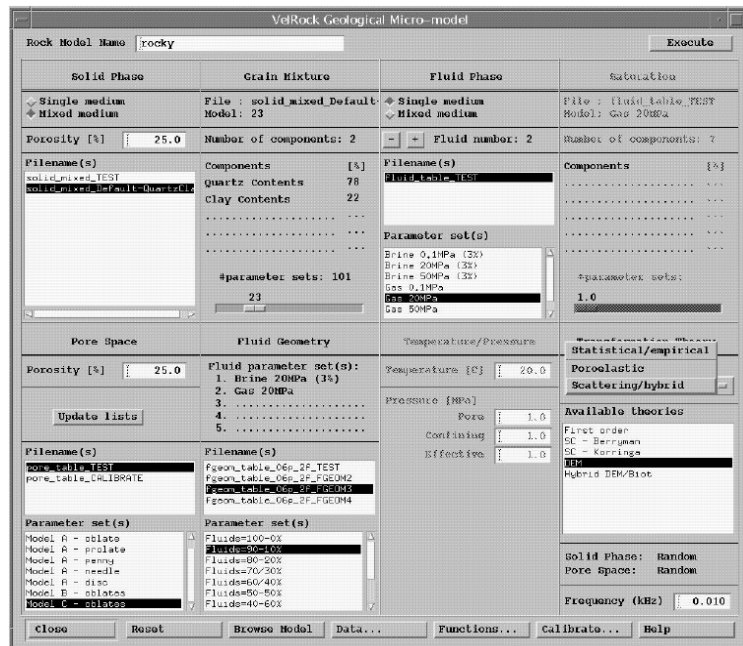


Fig. 22 Modelo micro de integración de propiedades petrofísicas, Tomado de Manual Velrock

Para la definición de las propiedades del modelo, se contó con los datos determinados tanto en laboratorio como en campo. La elaboración de una librería de parámetros petrofísicos llevó el siguiente orden:

1. Elaboración litológica del modelo de roca

A partir de los minerales identificados de las muestras en ripios, y de los óxidos determinados por DRX se elaboro una matriz numérica de roca. La litología de los tres upholes consta principalmente de arcillas, arenas, y óxidos tipo goethita, hematita y pirita, con porcentajes bajos que varían en cada pozo. Los valores de modulo de compresibilidad, módulo de cortante (propiedades elásticas) y densidad de cada mineral ya estaban incluidas en las librerías provistas en el software.

2. Construcción del fluido

La sustitución de fluidos utiliza las ecuaciones de Gassman para líquidos no viscosos y líquidos viscosos usando las propiedades de la matriz con el fin de determinar propiedades sísmicas (velocidad).

Como estamos hablando de modelos para la capa meteorizada, la saturación de la primera capa contiene una mezcla entre aire y agua (parcialmente saturada), y para el pozo 2 se adicionó un tercer fluido que es el bitumen. Para esto fue necesario determinar las propiedades elásticas del aire, el agua y el bitumen que se consideró como un crudo pesado con un API de 10.

Agua → Bulk: 2.2×10^9 Pa; Shear: 0; Densidad: 1 g/cm^3

Aire → Bulk: 1.01×10^5 Pa; Shear: 0; Densidad: 0.012 g/cm^3

3. Porosidad

En este caso es una variable a ser calculada ya que los valores determinados a partir de secciones delgadas son inciertos debido a que son muestras en ripios y se despreció la porosidad que presenta la arcilla. Para las dos primeras capas se hicieron variar los valores de la porosidad dentro del rango establecido para arenas y arcillas (anexo 4) hasta que por ensayo y error se logró obtener la velocidad determinada por Rueda (2007).

4. Geometría de poros

La geometría de poros se determinó para arenas visualmente a partir de láminas delgadas. La clasificación realizada para los tres grupos con valores de 1, 0.1 y 0.01 donde 1 corresponde a poros esféricos, 0.1 poros ovalados y 0.01 corresponde a poros en forma de fracturas o cracks. La incertidumbre estadística en los porcentajes de cada "aspect ratio" fue estimada en el 10%. Este valor fue

tomando en cuenta en el modelamiento como un rango de variación de los valores de geometría de poros a fin de encontrar la velocidad exacta de las capas.

A continuación se resumirá cada una de las características en porcentajes y valor puntual, utilizados para la determinación del modelo petrofísico:

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 DETERMINACIÓN DEL ESTRATO SOMERO

Cada modelo realizado contiene una capa meteorizada, una submeteorizada y una de roca intacta. Cada capa tiene propiedades petrofísicas determinadas en laboratorio y por medio del modulo Velrock. Para la determinación del espesor del estrato somero se tuvo en cuenta la descripción macroscópica de las muestras en ripios y los modelos de velocidad obtenidos por Rueda (2007). Estas dos fuentes de información fueron agrupadas en una columna litológica que explica el cambio de estas velocidades. Las columnas superpuestas con los modelos de velocidades son las siguientes:

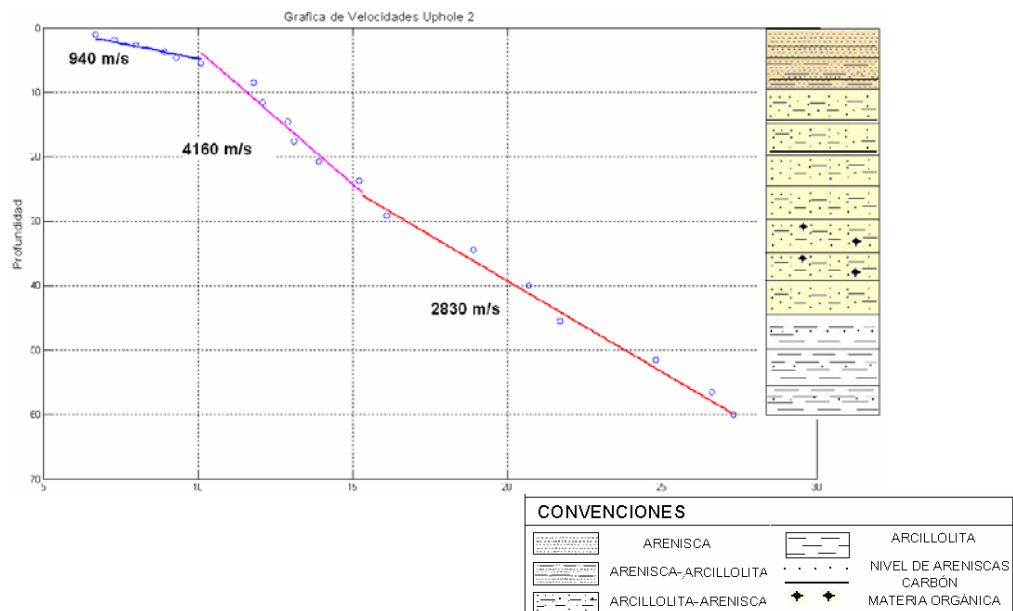


Figura 22 Modelo de velocidades y columna litológica del uphole 2. Los círculos representan los picados de los tiempos de arribo. Las líneas representan las capas de diferente velocidad obtenidas por regresión lineal de grupos de picados.

Las altas velocidades de la segunda capa se pueden explicar por la presencia de mantos de carbón (entre 3400 a 4200 m/s, Potter, 1996) descritos en este pozo. Estos mantos no se encuentran en la tercera capa lo cual podría explicar la disminución de velocidad en la tercera capa.

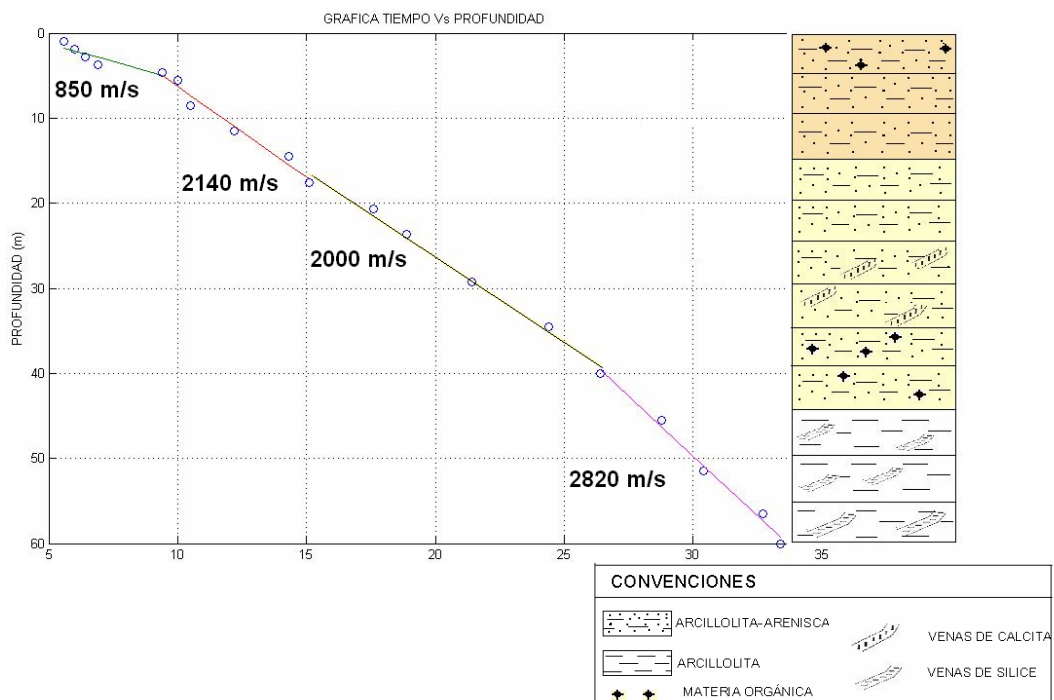


Figura 23 Modelo de velocidades junto a columna litológica del uphole 3. Los círculos representan los picados de los tiempos de arribo. Las líneas representan las capas de diferente velocidad obtenidas por regresión lineal de grupos de picados.

El modelo de velocidades del uphole 3 tiene 4 capas. Para comparar el modelo de este uphole con el modelo estándar de tres capas de los demás upholes, se hizo una regresión lineal de los picados de las capas 3 y 4 para obtener una tercera capa cuya velocidad resultante fue de 2360 m/s. Las altas velocidades de esta última capa podrían explicarse por la presencia de venas de calcita y sílice que se encontraron en estas profundidades.

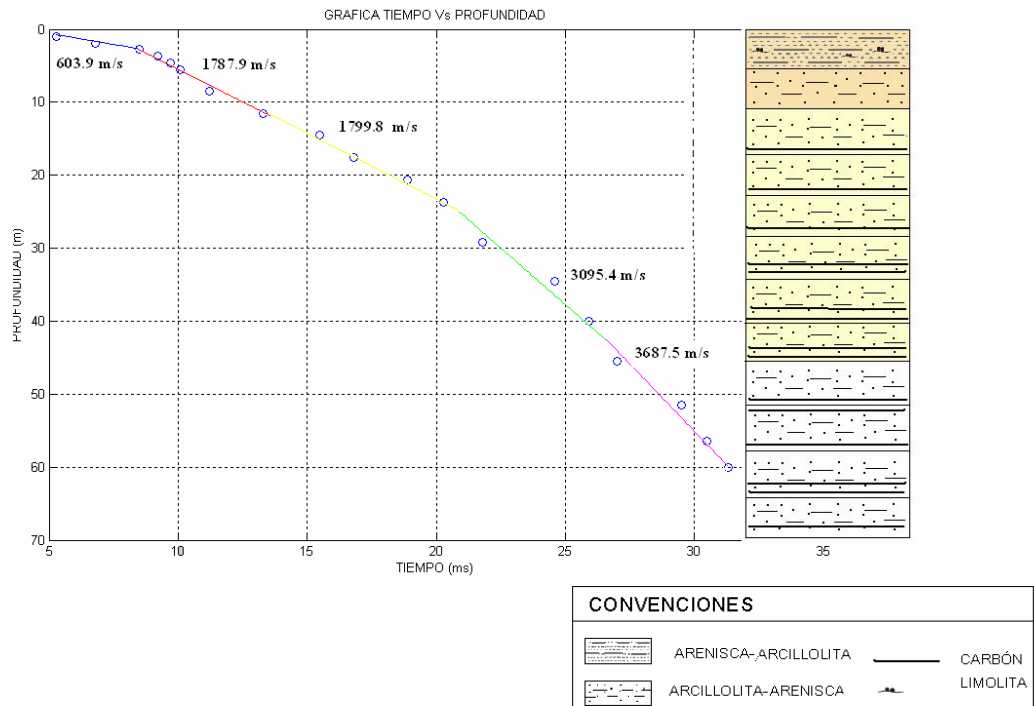


Figura 24 Modelo de Velocidades junto a Columna Litológica del Uphole 4

Un modelo aproximado de velocidades de onda P se determinó para el uphole 4 mostrando 5 capas de velocidad. La capa meteorizada se interpretó formada por las capas de velocidad 1, 2 y parte de la capa 3. El límite entre la capa 1 y 2 es interpretado como el nivel freático. La capa submeteorizada comienza a partir de los 25 m e incluye parte de las capas de velocidad 3 y 4. Para la segunda capa se determinó una velocidad 3095.4 m/s y para la tercera capa una velocidad de 3687.5 m/s. Esta alta velocidad concuerda con los mantos de carbón que son observables a partir de los 15 metros de profundidad.

Al comparar los modelos de Rueda (2007) y los modelos realizados para diferenciar los espesores de la capa meteorizada determinado a partir de las muestras geológicas puede observarse que el límite entre la capa submeteorizada y roca intacta no concuerdan con el cambio de velocidad. En los modelos de

muestras de ripios (Figuras 26, 27 y 28) la roca intacta comienza alrededor de los 45-50 metros mientras que en los modelos de velocidades se distingue el espesor de la roca intacta a partir de los 30-40 metros.

6.2 INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La capa del suelo hace parte de la capa meteorizada, que algunas veces dependiendo del nivel freático puede coincidir con el estrato somero. A partir de su coloración y textura se clasificó el tipo de suelo y características geológicas. A continuación se describe la geología de cada pozo:

Uphole 2

Presenta suelos franco arenosos con una alta coloración rojiza, bien drenados por precipitaciones anuales entre 1900 a 2000 mm con temperaturas de 27 a 28°C. El espesor de la capa meteorizada disminuye a medida que aumenta la profundidad (figura 26). La formación presente en este pozo es la Formación Los Cuervos que se caracteriza por tener intercalaciones de material arenoso y arcilloso. A partir de la profundidad de 50 metros las arenitas comienzan a disminuir en porcentaje, posiblemente por que se encuentra cercanas al contacto Formación Mirador la cual presenta litología principalmente arcillosa (Figura 25).

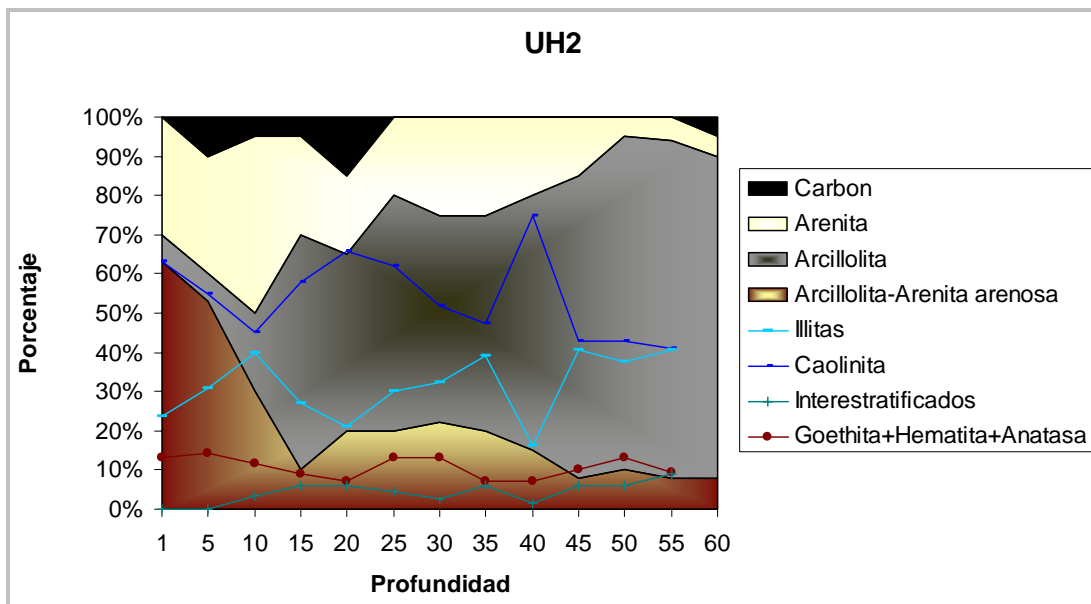


Figura 25 Esquema representativo de las variaciones de litologías y minerales de alteración del uphole 2. El material meteorizado (arcillolita-arenitas arenosas) se representa en color rojizo-amarillo

El análisis de DRX permitió establecer la mineralogía de cada muestra en los pozos. Es posible observar el comportamiento variado que tienen tanto los óxidos como las arcillas tipo caolinita-illita a través de todo el pozo, estos valores disminuyen a partir de los 45 metros donde se considera la roca intacta. La capa meteorizada se definió con base en la presencia de arcillolita-areniscas de tono amarillo-rojizo que corresponde a los primeros 10 metros y la submeteorizada hasta los 45 metros. Los interestratificados presentes son una evidencia de la alteración de unos minerales a otros en este caso de minerales que sufrieron una transformación a micas tipo illita, el óxido de titanio (Anatasa) se encuentra en esta formación aunque en poca proporción. El carbón es representativo en esta formación con altos contenidos en las primeras capas, como se evidencio en campo, encontrándose varias minas de carbón en la vía que conduce de Cucutá a Tibú.

Uphole 3

Suelos tipo arcilloso limosos, bien drenados con precipitaciones anuales entre 1700 y 1800mm. La Formación León fue perforada por este pozo, aunque es posible observar material limoso en las primeras profundidades. El espesor meteorizado corresponde a los primeros 15 metros y la capa submeteorizada se encuentra en el rango de 20 a 45 metros.

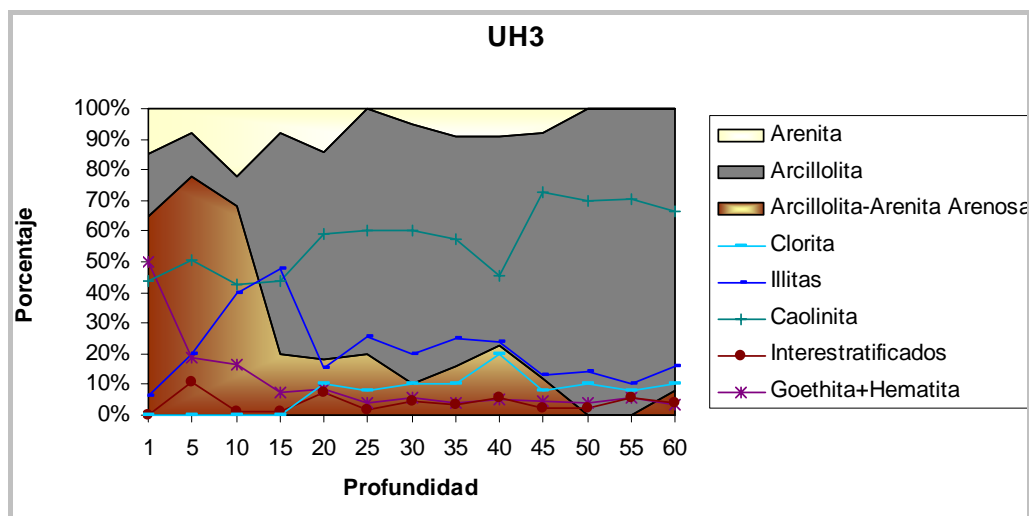


Fig. 26 Esquema representativo de las variaciones de litologías y minerales de alteración del uphole 3

El mineral de meteorización principal es la caolinita aunque la clorita aparece en este pozo con un porcentaje considerable en las primeras capas. Puede observarse el gran contenido de arcillolitas pertenecientes a la Formación León. La capa meteorizada corresponde a los primeros 15 metros y la submeteorizada desde los 15 metros hasta los 45 metros. Igualmente la presencia de interestratificados fue observable en la prueba de DRX, la cual se evidenció altos contenidos de illita alteradas por capas de esmectitas dando un interestratificado Illita/esmectita (Anexo 5).

Uphole 4

Suelos arenosos son típicos en esta Formación Carbonera, presenta precipitaciones anuales entre 1900 y 2000 mm y una temperatura de 26 a 27°C. Las capas de carbón son abundantes desde los espesores más superiores esto fue observado en campo donde varias minas de carbón son presentes en esta región. La capa meteorizada en este pozo corresponde a los primeros 15 metros. En las muestras en rípios estas capas de carbón se observaron a partir de los 15 metros siendo abundantes a partir de los 30 metros.

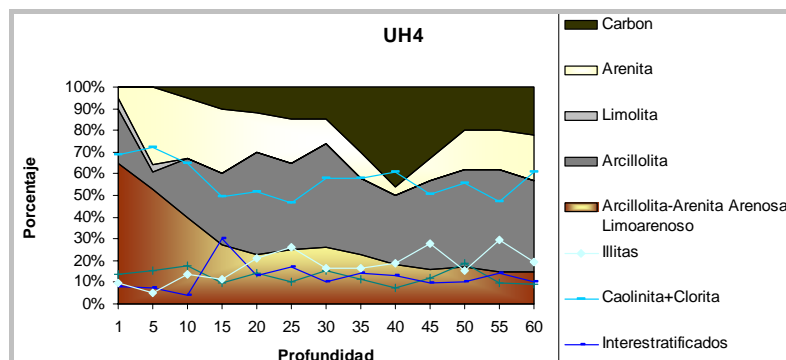


Figura 27 Esquema representativo de las variaciones de litologías y minerales de alteración del uphole 4

La caolinita es el principal mineral de alteración presente y la evidencia de interstratificados en este pozo corresponde a un porcentaje considerable el cual el principal interstratificado es el tipo illita/esmectita.

6.2.1 Tipos de Meteorización en el área de Uribante

Como corroboración de los resultados de descripción litológica y pruebas DRX, se estimó el tipo de meteorización predicha a partir de la precipitación media anual y la temperatura media anual según Peltier (1950) y Cooke & Doorkamp (1990).

Upholes	Temperatura	Precipitación Anual
	Anual	
UH2	28.5 °C	1950 mm
UH3	27.5 °C	1750 mm
UH4	26.5 °C	1950 mm

Tabla 12 Datos de Temperatura y Precipitación Anual para los tres upholes, Tomado de CORPONOR

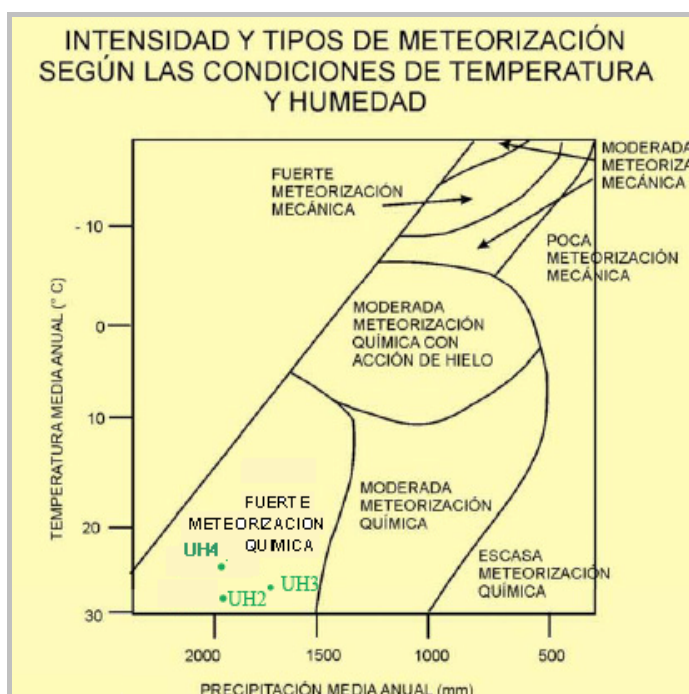


Figura 28 Intensidad y Tipos de Meteorización para los tres upholes según Cooke & Doorkamp (1990)

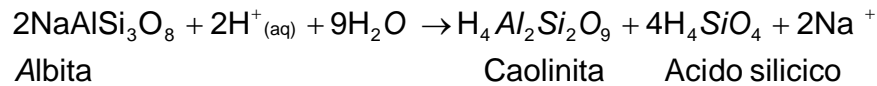
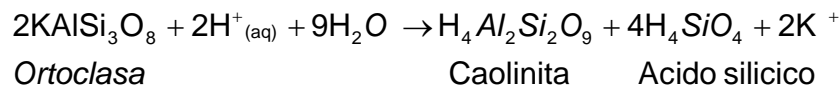
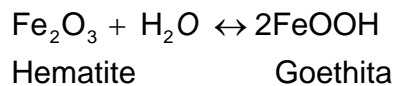
Se confirma que el tipo de meteorización esperada en el área de Uribante corresponde a una meteorización química de tipo fuerte, la precipitación media en esta región es alta y la temperatura corresponde a un rango entre 26 y 29 °C típico de regiones tropicales.

Reacciones de los principales procesos de alteración en las muestras

El mineral arcilloso predominante en los 3 uphole es la caolinita, luego su proceso de formación es principalmente debido a la alterabilidad de los minerales de Ortoclasa y Albita sufrida por una reacción química entre estos minerales y el agua (Proceso de Hidrólisis).

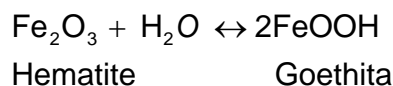
La Ortoclasa y la Albita se convierten en caolinita.

Hidrólisis



En el uphole 2 la presencia de Goethita y Hematita es más predominante que en los otros dos pozos, luego muchas veces la Hematita se convierte en Goethita, u otro mineral se convierte en uno arcilloso, esto ya sea por que las moléculas de agua se adhieren a un mineral para formar uno nuevo (Proceso por hidratación)

Hidratación



De igual manera, la Hematita, presente principalmente en el uphole 2 corresponde a un proceso por oxidación causado cuando el oxígeno se combina con el hierro para formar el óxido ferrico.

cuervos de 12%, formación León 20% y para la formación carbonera 29%. Para la formación Carbonera no se obtuvo ningún modelo solución que tomara este valor de porosidad, posiblemente por que a partir de la segunda capa de este pozo se encuentra una alta concentración de carbón. El modelamiento determinó para esta formación una porosidad óptima de 10% (Tabla 15).

Geometría de poros (Aspect Ratio)

La geometría de poros se estimó a partir de las secciones delgadas. Sin embargo estas medidas tienen un error asociado que fue considerado el 10%. Para modelar las velocidades correspondientes a las capas de velocidad se optó por variar los valores de aspect ratio dentro del rango de error de medición (no mayor al 10%). Es necesario resaltar que estas secciones se realizaron a partir de las muestras en ripios. Inicialmente los resultados no deberían ser confiables ya que estamos hablando de algo microscópico escalado a espesores de metros, es decir a la escala de la sísmica.

	Porosidad	Aspect Ratio	Limite Voigt	Limite Reuss
CAPA 1	30%	67 - 17 - 16		
CAPA 2	14%	68 - 22 - 10		
CAPA 3	12%	54 - 46 - 0		

Tabla 13 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del Uphole 2. En gris se representa el tipo de límite usado.

	Porosidad	Aspect Ratio	Limite Voigt	Limite Reuss
CAPA 1	36%	78 - 12 - 10		
CAPA 2	32%	86 - 12 - 2		
CAPA 3	20%	88 - 12 - 0		

Tabla 14 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del uphole 3

	Porosidad	Aspect Ratio	Limite Voigt	Limite Reuss
CAPA 1	25%	30 - 46 -24		
CAPA 2	11%	79 -21 - 0		
CAPA 3	10%	40 - 60 - 0		

Tabla 15 Valores de aspect ratio y profundidad a partir de los límites de Voigt y Reuss del uphole 4

En el capítulo precedente se observó que el límite de Voigt describe mejor las velocidades sísmicas con bajas porosidades. Para determinar la roca numérica fue necesario en las capas profundas seguir la teoría de Voigt, por su baja porosidad. Las capas superficiales son mejor descritas con el límite de Reuss.

Es posible observar que los cracks (aspect ratio 0.01) disminuyen con la profundidad apareciendo nula en la tercera capa de los tres uphole, y que a mayor concentración de poros circulares (aspect ratio= 1) mayor es la velocidad.

6.4 DETERMINACIÓN DE RANGOS DE POROSIDAD PARA VELOCIDADES INFERIORES CORRESPONDIENTES A LA CAPA DE BAJA VELOCIDAD

A partir de todos los estudios realizados para encontrar las propiedades petrofísicas que determinan las bajas velocidades en el estrato somero, se llegó a la conclusión que las propiedades más representativas para este a parte de la litología son la geometría de poros y la porosidad. La saturación es un factor de segundo orden en este ya que los cambios observados en estos modelos correspondían a una variación no mayor de 150 m/s. Se consideró a partir del tipo de suelo que la saturación en agua máxima que puede llegar a tener esta primera capa en los suelos de Uribante es de 25%.

Es necesario resaltar que las porosidades en suelos tropicales, para materiales arcillosos y arenosos no sobrepasan del 50% (Anexo 7). A continuación se muestra para distintos valores de aspect ratio y para porosidades no mayores al 60% los cambios de velocidad registrados.

Se presentan tres graficas para tres materiales distintos: arenas, arcillas y una mezcla de arcillas y arenas, en el cual se determinan las distintas velocidades de onda P para valores de porosidades menores del 50% y distintos valores de aspect ratio.

Graficas para aspect ratio=1 (poro esferico, primer valor), 0.1 (poro ovalado, segundo valor)

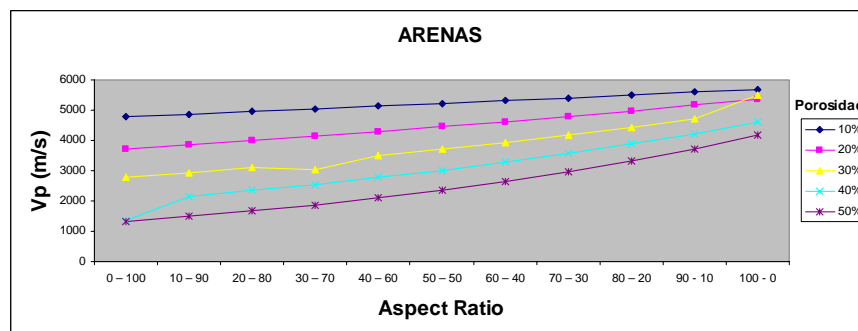


Figura 29 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para arenas

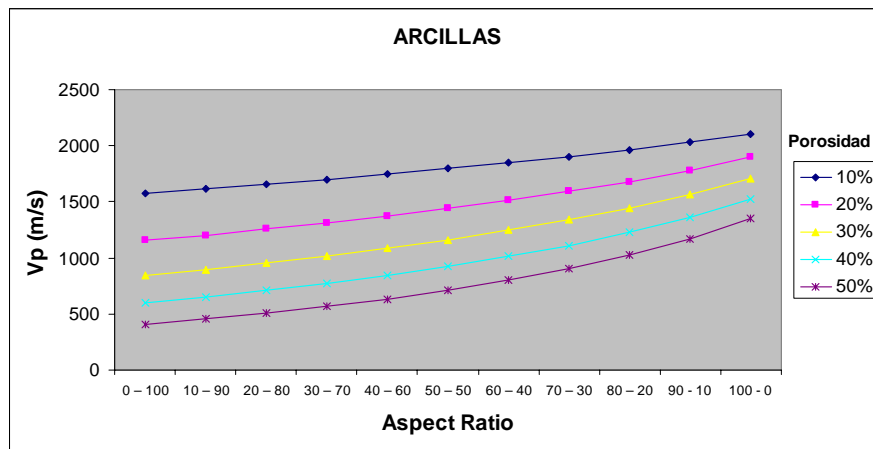


Figura 30 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para arcillas

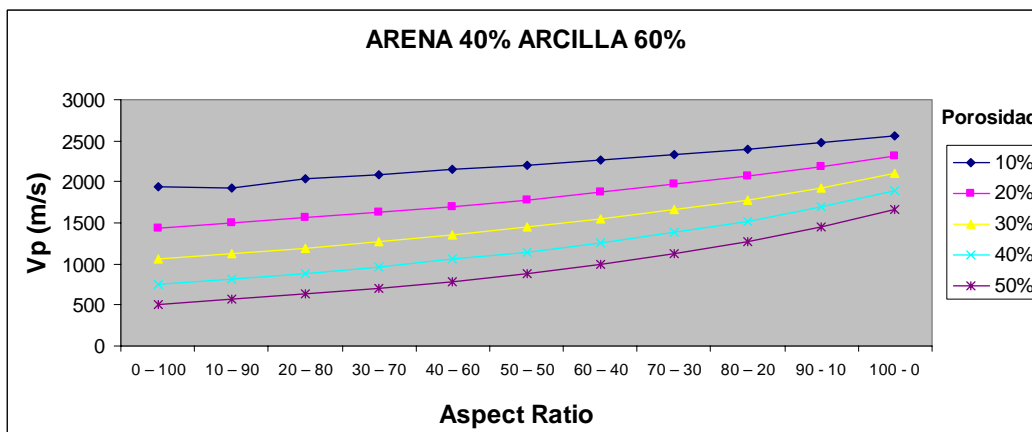


Figura 31 Valores Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para 40% de contenido de arenas y 60% de contenido de arcillas

Graficas para aspect ratio=1 (poro esferico, primer valor), 0.1 (poro ovalado, segundo valor), 0.01 (Fracturas o cracks, tercer valor)

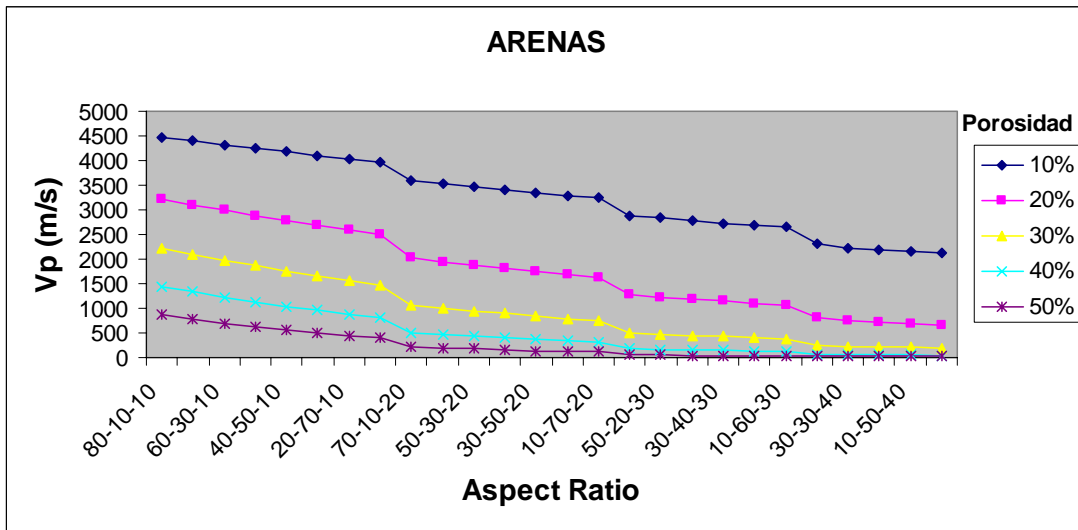


Figura 32 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para arenas

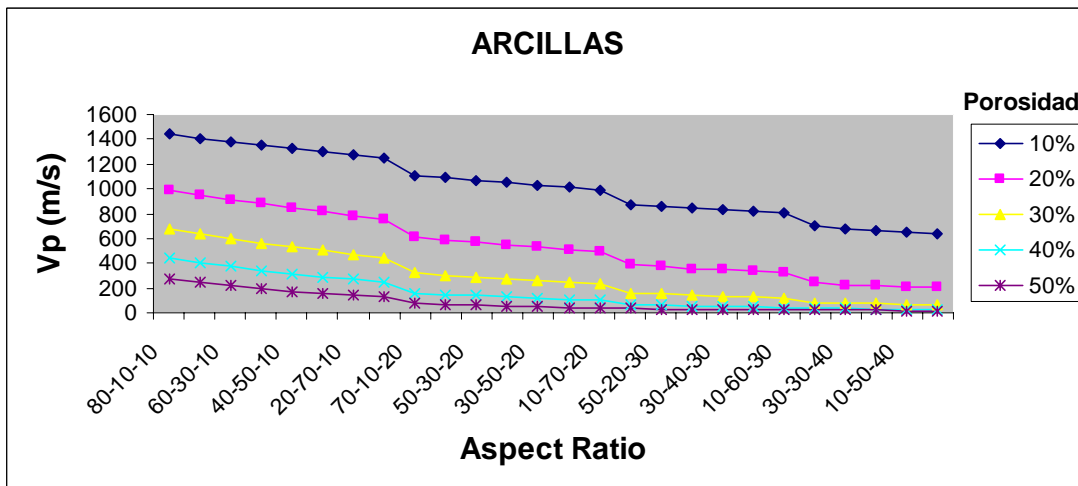


Figura 33 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para arcillas

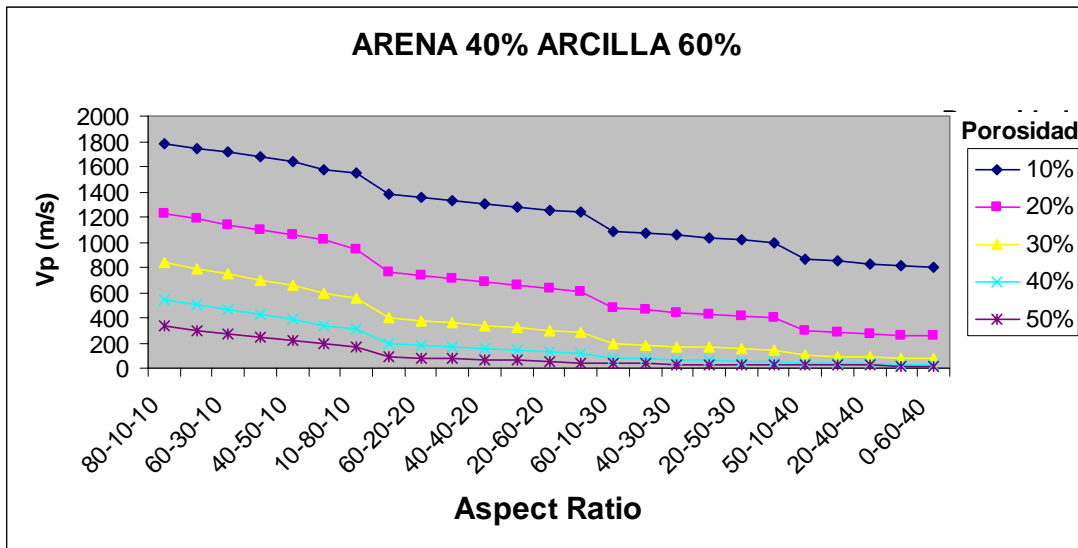


Figura 34 Valores de Velocidad P versus Aspect Ratio con distintos valores de porosidad para 40% de contenido de arenas y 60% de contenido de arcillas

Es posible observar que al tener una mayor concentración de penny-cracks (0.01) las velocidades en el estrato somero tienden a disminuir y al tener una mayor concentración de geometrías esféricas (1) las velocidades tienden a aumentar. En modelos numéricos de arcillas litificadas con poros penny-crack las velocidades no superan los 1500 m/s y las arenas tienden a tener velocidades altas. A mayor porosidad menor es la velocidad lo que explica que en la capa superficial de baja velocidad las porosidades son altas y se encuentran en el rango 25-35 (tablas 13, 14 y 15). Igualmente en estas tablas se observó que la mayor concentración de penny-cracks se encuentra en la capa superficial. Por lo tanto las características de primer orden que afectan las velocidades del estrato somero son las bajas porosidades y la alta concentración de cracks.

6.5 MODELAMIENTO SÍSMICO DE LOS DATOS UPHOLE

Para realizar el trazado de rayos en el modelo, se utilizó la metodología de VSP que consiste en una fuente en superficie y receptores de forma vertical a lo largo del pozo, este corresponde a lo analizado para un pozo vertical somero “uphole”. La fuente a una distancia no mayor de 3 metros del pozo se encuentra sobre la superficie y 19 receptores a lo largo del pozo, para la generación del sismograma se determinó usar una ondícula tipo ricker zero 0.30. El trazado de rayos para cada uno de los tres uphole generó las siguientes imágenes:

Uphole 2

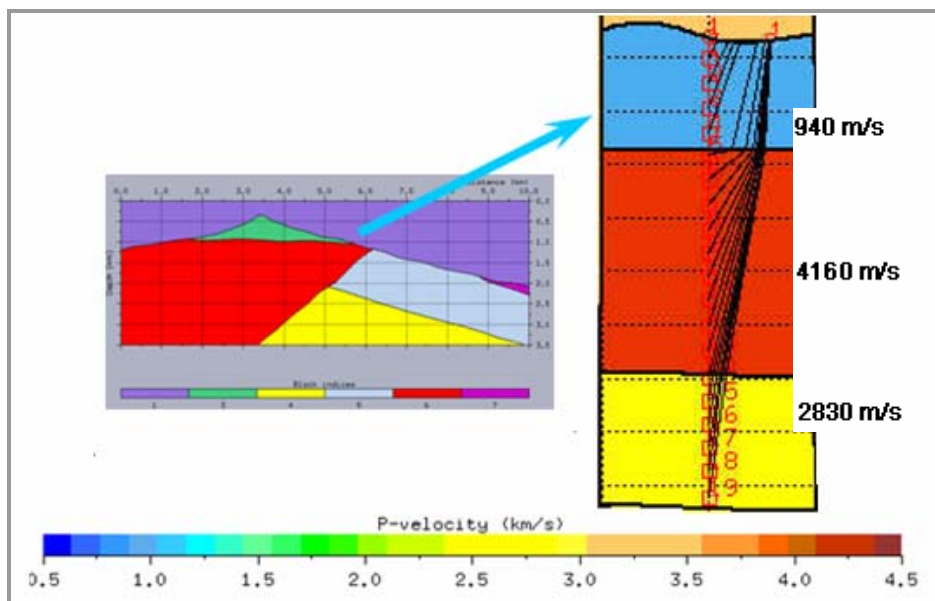


Figura 35 Modelo 2D y trazado de rayos del uphole 2

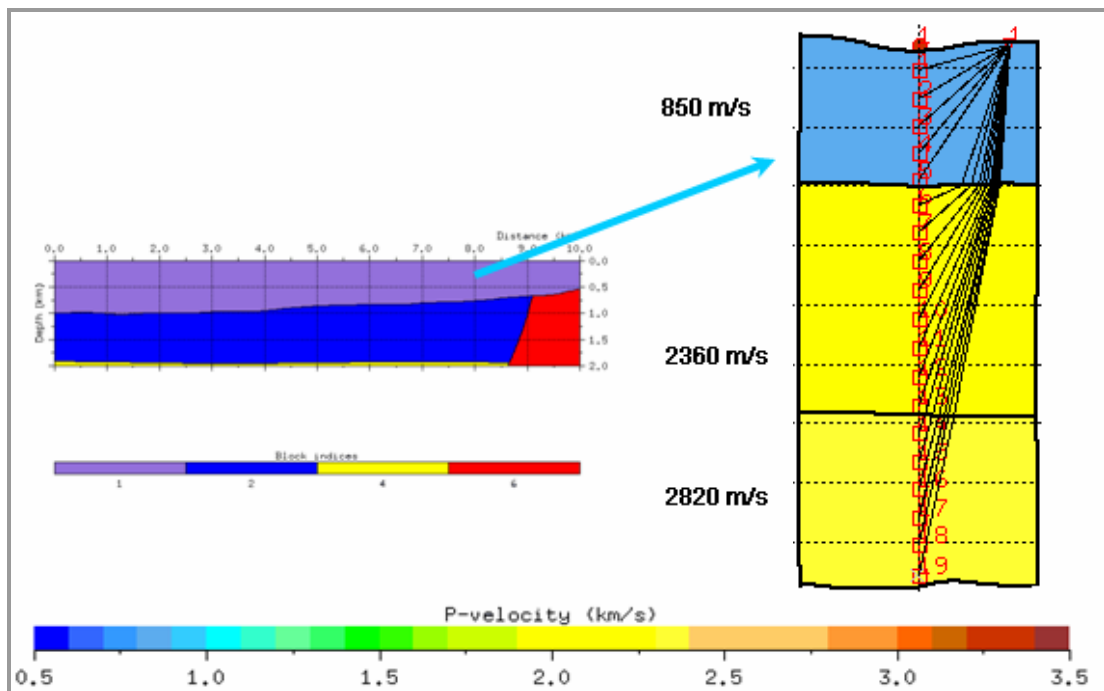


Figura 36 Modelo en 2D y trazado de rayos del uphole 3

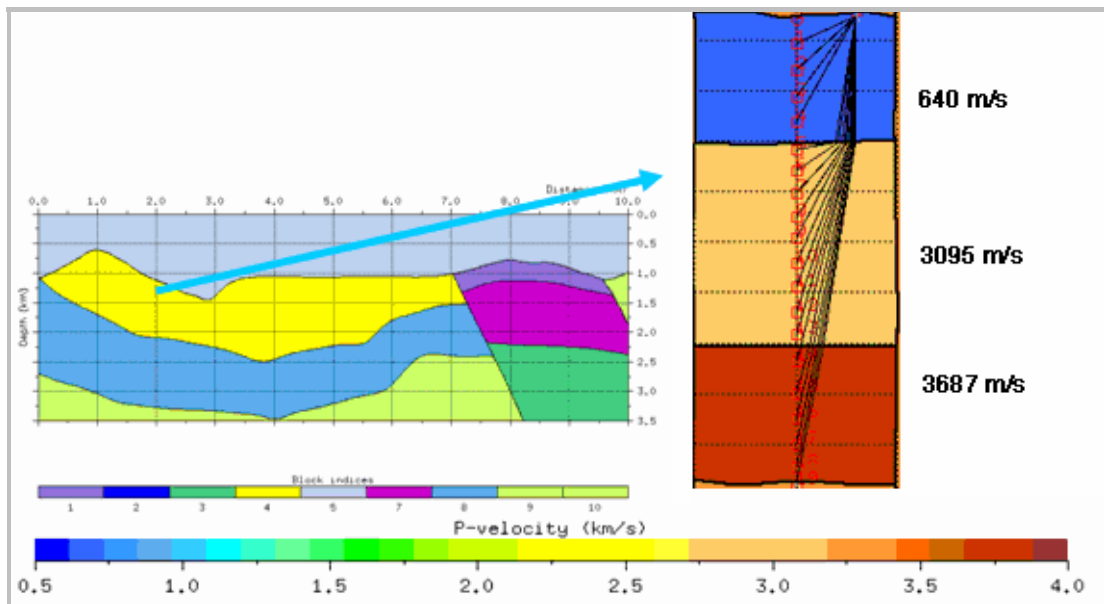


Figura 37 Modelo en 2D y trazado de rayos del uphole 4

La simulación de datos petrofísicos demuestra el cambio de velocidades a través de las distintas capas del uphole.

CONCLUSIONES

A partir de la descripción litológica, la base de la capa meteorizada promedio de los 3 upholes se encuentra en un rango de profundidad de 10 a 15 metros. La base de la capa submeteorizada se encuentra en promedio a los 45 metros. La roca intacta o formación como tal se presenta a partir de los 50 metros en donde se corrobora ya que el material predominante es la litología típica de la formación.

El uphole 3 presenta un alto valor de porosidad posiblemente se puede explicar por una porosidad crítica correspondiente a la arcillas de esta zona, las porosidades de los upholes 2 y 4 igualmente presentan porosidades altas con valores de 30% y 25% respectivamente correspondientes a una litología de arenas y arcillas.

El tipo de meteorización que se da en todos los upholes es meteorización química fuerte, siendo la caolinita el principal mineral arcilloso, estos suelos tropicales con alta coloración rojiza son caracterizados por las intensas lluvias y altas temperaturas que hacen posible esta meteorización y alterabilidad de unos minerales a otros, corroborado con la información de campo y estudios realizados en el laboratorio.

La topografía de esta zona se encuentra en un rango de pendientes moderadas a fuertes, lo cual genera deslizamientos con la lluvia caída en el lugar y ayuda a los procesos de meteorización a partir de la circulación, infiltración y escorrentía del agua en estas zonas inclinadas, esto concluye que para topografía jóvenes como se encontró en los upholes 2 y 4 el espesor de meteorización corresponde a un nivel más superficial que en una topografía madura a la cual pertenece el uphole 3.

Los cracks o fracturas consideradas para arenas como contactos entre grano, influyen en las bajas velocidades de onda sísmica para las primeras capas. Esto se corrobora con los análisis de secciones delgadas en los cuales su porcentaje disminuye a medida que aumenta la profundidad, en las placas de la tercera capa (roca intacta) no se observaron cracks.

El tamaño del poro de acuerdo a voigth y reuss se relacionan con el nivel de porosidad. Los valores altos aplican para valores superiores al 20% que corresponde con Reuss y las bajas porosidades menores del 20% para Voight.

Se determinó que los factores de primer orden influyentes en las bajas velocidades del estrato somero son la litología, porosidad y geometría de poros. La saturación se encontró como un factor de segundo orden.

Para las capas superficiales ninguna combinación de parámetros físicos podía explicar las velocidades observadas cuando se tomaban las porosidades obtenidas a partir de láminas delgadas. Fue necesario para ciertas capas variar la porosidad hasta que ajustara al valor observado de velocidad de onda P ya que este es nuestro parámetro de entrada en el modelo. Esto concluye que las pruebas de laboratorio comúnmente aplicadas para muestras profundas pierden validez en el estrato somero.

El estrato somero puede ser caracterizado por las altas porosidades, el gran número de cracks y las arcillas como litología predominante que determinan las bajas velocidades en estas zonas tropicales.

APORTES Y RECOMENDACIONES

Pocos estudios de estrato somero se han realizado en ambientes tropicales, para explicar las bajas velocidades en esta zona fue necesario realizar una investigación detallada de la litología del lugar a partir de muestras en ripios y un estudio petrofísico para determinar de que manera son influyentes estas características. Es necesario tener en cuenta que esta capa superficial es un medio poroso no saturada lo cual hace bastante compleja la determinación del efecto de propiedades petrofísicas como son la porosidad y la geometría de poros en materiales no consolidados. Se puede afirmar que las bajas velocidades del estrato somero son causadas por las altas porosidades, presencia de geometrías de poros en forma de fracturas o “cracks” y por el contenido abundante arcilla encontrada en zonas tropicales.

Como recomendación para futuras investigaciones, sería ventajoso tener muestras en núcleos, lo cual disminuye la incertidumbre en cuanto valores de porosidades, geometría de poros y mejora la descripción litológica. Sería interesante combinar la sísmica con otro método que permita medir datos de porosidad exactas en estas capas superficiales (por ejemplo métodos electromagnéticos, gamma ray superficial, etc)

BIBLIGRAFÍA

Avseth P., Mukerji T. and Mavko G. Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk. Cambridge University Press, 2005

Badillo J. y Rodríguez R. Mecánica de Suelos Tomo I, tercera edición 1990, pag 152-160.

BAVER, L.D. Soil physics. 2ed, 398 p. New York, Wiley, 1956.

BAVER, GARDNER, W.H y GARDNER, W. R. Física de suelos. México, CRAT, 1973. 52p p.

Besoain E. Mineralogía arcillas de suelos, Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura IICA, San José, Costa Rica. 1985

COOKE, R.U. y DOORNKAMP, J. C. Geomorphology in environmental management. Oxford,UK: Clarendon Press. 410 pp, (1990).

Cox M. Static Corrections for the seismic reflection surveys, cap 2-4, 1999

Cruz y Caballero V. Manual de Mineralogía, Universidad Industrial de Santander, 1998

ECOPETROL, Informe de ICP-UST ID0153-07-059, Análisis mineralógico de los pozos 2, 3 y 4 de la zona de Uribante, 207

ECOPETROL, Programa sísmico de Uribante, 2005

Gil D, Guerrero A., León L., Otalora G. y Pimienta V. Determinación de algunos componentes de la fase diagnóstico del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Zulia, Corporación Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR), 2007

Gregor T. Baechle, Arnout Colpaert, Gregor P. Eberli and Ralf J. Weger, Modeling carbonate pore structure effects on velocity using a dual porosity DEM theory, SEG 76th Annual Meeting, San Antonio, Texas, 2007

Gutierrez D. y Castellanos J, Cartografía Geológica y Caracterización estratigráfica de la zona comprendida entre los municipios de San Gil, Villanueva y Aratoca (Departamento de Santander), con fines hidrogeológicos, Universidad Industrial de Santander, 2006

Hulbut K, Manual de Mineralogía de Dana Cuarta Edición, 2001

Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, Suelos de Colombia, 1995

Malagon D. Aspectos genéticos y taxonómicos de algunos suelos de Terecay (Vichada), Colombia, en la capacidad bioproductiva de sabanas. Ed. San José, Montes R. Caracas, Centro Internacional de Ecología Tropical, 1987.

Mavko G. and Dvorkin J, Rock Physics Handbook, Stanford University 1996.

Mukerji T. and Mavko G, Recent Advances in Rock Physics and Fluid Substitution Stanford Rock Physics Project, Stanford University, Stanford, USA, 2006

Nur, A., Mavko, G., Dvorkin, J., and Galmundi, D., Critical porosity: the key to relating physical properties to porosity in rocks: Proc. 65th Ann Int. Meeting Soc. Expl. Geophys., 878. 1995,

Olaya D., Hernández L., Arango D., Infante H., Murillo S., Gónzales C y Páez A. Determinación de algunas variables consideradas dentro de la etapa de diagnóstico del plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Pamplonita, Corporación Regional de la Frontera Nororienta (CORPONOR), 2007

Raymer, L. L., Hunt, E. R., and Gardner, J. S., An improved sonic transit time to porosity transform: 21st Annual Logging Symposium, 1980

Rueda D, Propuesta para una nueva metodología MA, Congreso Colombiano de Geología, 2007

Rucks L., García F., Kaplán A., Ponce de León y Hill M. Propiedades Físicas del Suelo, Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica Uruguay, 2004

Sheriff R. E., Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics: Soc. Exp. Geophysic, 1991

Suarez J. Estabilidad de Taludes, 1990

Wadsworth F. Producción Forestal para América tropical (Departamento de agricultura de los EEUU USDA), 2000

Young, Tropical soils and soil survey. Cambridge, UK: Geographical Studies. 468 p. 1976

[http:// www.cenamec.org.ve](http://www.cenamec.org.ve)

<http://geology.csuonoma.edu>

<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

<ftp://ftp.fao.org>